

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.472>



以初级生产力与固碳规律为线索探讨陆相页岩中有机质的富集规律

毛小平¹, 陈修蓉², 陈永进¹, 李岁岁¹, 李 振¹, 朱启轩¹

1. 中国地质大学能源学院, 北京 100083

2. 清华大学, 北京 100084

摘要: 陆相优质烃源岩主要在盆地中心深湖—半深湖等深水环境发育, 但大量页岩气勘探证实, 富有机质页岩更靠近湖盆边缘, 因此有必要深入剖析陆相湖盆有机质富集的规律. 采用类比法对比页岩油气、煤的成矿条件, 结合湖泊的初级生产力、固碳速率、化石发育, 采用古地貌及埋藏史恢复手段, 提出了页岩发育于浅水局限环境的六大证据. 研究发现, 页岩油气和煤具有相似的成矿模式; 与浅水环境的煤、蒸发盐岩等具有共生关系; 浅水环境下固碳速率远大于深水环境. 结论是, 页岩油气富集于浅水湖湾、间湾等封闭—半封闭环境; 最大湖泛期凝缩段应为贫有机质段. 最后以松南等地区进行验证, 说明本结论具有普适性, 可更好地指导陆相页岩油气勘探.

关键词: 页岩气; 烃源岩; 湖湾; 最大湖泛期; 叶肢介; 初级生产力; 矿床学.

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2024)04-1224-21

收稿日期: 2022-07-04

Discussion on Enrichment Law of Organic Matter in Continental Shale with Clue of Primary Productivity and Carbon Storage Law

Mao Xiaoping¹, Chen Xiurong², Chen Yongjin¹, Li Suisui¹, Li Zhen¹, Zhu Qixuan¹

1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: It is generally believed that it is easy to enrich oil and gas in deep-water environments such as deep lacustrine to semi-deep lacustrine in continental basins, but a large number of shale gas exploration has proved that shale gas reservoirs are generally located closer to the edge of lacustrine basins, so it is necessary to further study the law of organic matter enrichment in continental lacustrine basins. In this paper, the metallogenic conditions of shale oil, gas and coal are compared by analogy method. Combined with the primary productivity of the lake, the rate of carbon sequestration and fossil development, the paleo-geomognomy and burial history recovery means are used to put forward six evidence that shale developed in shallow water restricted environment. It is found that shale oil, gas and coal have similar metallogenic patterns, and have a symbiotic relationship with coal and evaporative salt in shallow water environment. The carbon sequestration rate in shallow water environment is much higher than that in deep water environment. The conclusion is that shale oil and gas are enriched in closed to semi-closed environment such as shallow lake

基金项目: 省级重大创新工程项目(No. [2022]ZD003).

作者简介: 毛小平(1965—), 男, 副教授, 博士, 主要从事烃源岩评价、油气地质、地热方面的研究工作. ORCID: 0000-0002-2284-8833.

E-mail: maexp9@163.com

引用格式: 毛小平, 陈修蓉, 陈永进, 李岁岁, 李振, 朱启轩, 2024. 以初级生产力与固碳规律为线索探讨陆相页岩中有机质的富集规律. 地球科学, 49(4): 1224—1244.

Citation: Mao Xiaoping, Chen Xiurong, Chen Yongjin, Li Suisui, Li Zhen, Zhu Qixuan, 2024. Discussion on Enrichment Law of Organic Matter in Continental Shale with Clue of Primary Productivity and Carbon Storage Law. *Earth Science*, 49(4): 1224—1244.

bay and interbay. The condensed section of the maximum flood period should be the organic-poor section. Finally, the results are verified in Songnan area, indicating that this conclusion is universal and can guide shale oil and gas exploration better.

Key words: shale gas; hydrocarbon source bed; lake bay; maximum flooding period; leaf limb medium; primary productivity; ore deposit geology.

随着涪陵海相页岩气田的开发,近年来陆相页岩气也受到越来越多的关注,并陆续有了新的发现,但有机质的富集规律仍存在一些问题,主要体现在页岩气富集规律和实际勘探成果不太一致.对于陆相盆地有机质的富集环境,一般认为是深湖一半深湖的还原环境(刘官植,1959;邓茨兰和陈克仁,1963;锦言,1977),并从层序地层学角度给予了其解释,认为湖盆最大湖泛期,沉积沉降缓慢,产生了凝缩层(体),其中富含有机质(徐怀大,1997;顾家裕等,2005).在湖盆中部深水湖相则常富含有机质(胡见义等,1991);深湖和半深湖亚相可形成巨厚暗色泥岩,为良好的生油环境(朱筱敏,2008);深湖亚相以纯泥岩、页岩为主,有机质含量高(林春明,2019).在大型深水湖盆中,盆地形成早期的沉降—沉积中心是深湖、半深湖及浅湖厚层—巨厚层富有机质页岩发育的有利场所(张金川等,2004);烃源岩所处的地方,有大量植物、浮游生物沉淀堆积,最佳富集环境可以是浅湖一半深湖(黄东等,2018;何江林等,2022)、深湖一半深湖环境(姜在兴等,2013;倪冬梅,2021;何文渊等,2023)、深湖环境(邹才能等,2010;Yang *et al.*, 2022).即多数学者倾向于认为深湖、半深湖和浅湖环境才富有机质.姑且不论此环境正确与否,这类指标只代表水体深度,在实际寻找页岩气甜点中勘探指导价值不高.环湖盆一周,存在多圈浅湖、半深湖区域,但多数区域页岩中有机质丰度不高,且不含天然气,其根本原因或机制是什么值得深入研究.

虽然争议较大,但有一点是共同认可的,那就是页岩发育于低能还原环境.那么作为湖泊相的低能环境,前人更多地关注是深湖一半深湖这种低能环境(Gemaisson and Moore, 1980;张君峰等,2020),理由是深水还原环境有利于有机质保存,同时,远洋考察中深海放射虫软泥的发现(金性春,1981),导致找到放射虫化石的地层都划为深海相(李道琪,1984),更加夯实了这一理念.一个理想的陆源碎屑湖泊的沉积模式具有沉积物绕湖盆呈环带状分布的特点,即从湖岸至湖盆中央大致依次出现砂砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩、高碳泥岩(林春明,2019),从这个角度上看,页岩和泥岩在粒度上相

当,理当属于更深的深水环境.从湖泊相的7个亚相:湖成三角洲亚相、滨湖亚相、浅湖亚相、半深湖亚相、深湖亚相、湖湾亚相和湖泊重力流亚相中看,只有深湖一半深湖亚相、湖湾亚相被认为是低能环境.然而,前者在下层水体的确是低能和还原环境;而后者湖湾亚相也是低能环境,可能因其水体浅,被误认为不会出现强还原环境,而未受到足够重视.一些学者(袁选俊等,2015;朱如凯等,2017)关注到并引用了Picard (1971)所提出的富有机质黑色页岩的4种沉积模式:海(湖)侵模式、水体分层模式、门槛模式等,有一定参考价值,但其主要考虑的因素仍强调强还原环境(作者注:Picard的原文并未提到4种沉积模式).

大量的陆相页岩油、页岩气的勘探成果表明,一些较浅的水体或一些坡折带而(不是盆地中心)是最富有机质的层段(拜文华等,2010;蒋恕等,2017),这显然和层序地层中的最大湖泛期的凝缩段发育不完全一致.造成这种偏差的原因,会不会是因为有机质在深水环境中不富集,而是在湖泊相7个亚相中另一个低能环境:湖湾亚相这种浅水环境中富集?

为此,本文拟从环境学、生态学的初级生产力和固碳规律角度出发,深入探究页岩油气与煤、蒸发岩等矿种的关系与成矿模式类比,得出陆相页岩中的有机质可能富集于封闭或半封闭的浅水湖湾亚相,而不是深湖半深湖亚相.

1 含油气页岩发育于浅水湖湾亚相的几大证据

含油气页岩发育于浅水湖湾亚相有6方面的证据,具体如下.

1.1 叶肢介化石的发育

叶肢介化石最适宜生活的水深是1~20 cm,一般在现代池塘、水田、水坑等,特点是水体安静、波浪小(低能),在较深水环境(>20 m)含量极少,是重要的指相化石.双壳类生物化石生活环境略深,但也不能在较深水环境发育.李斌等(2018)研究了丹江口水库底栖生物群,发现丹江口水库湖泊深水

区以颤蚓为主(水深>20 m);丹江口过渡区、汉江过渡区浅水区域(水深<20 m)主要以带外壳的软体动物为主.前者颤蚓无骨骼和外壳,在地层中是难以作为化石保存下来;而后者为带外壳的软体动物,在地层中就会以双壳类生物化石保存下来.

拜文华等(2010)通过野外观察和综合研究,发现银额盆地北部苏红图坳陷在深湖一半深湖相地层中,其下白垩统巴音戈壁组K₁b暗色泥岩单层厚度小、累积厚度大,化石少;而靠近盆地边缘的浅水湖湾地区,页岩发育,单层厚度大,累积厚度小,油页岩含油率高,化石丰富,特别代表浅水环境的叶肢介化石丰富,如图1所示为该地区油页岩总厚度及含油率平面等值线图.盆地北部深湖一半深湖泥厚,化石少,累积油页岩厚度大,但单层厚度薄,含油率低至4.2%,不具工业开采价值;东南浅湖一半深湖湖湾亚相叶肢介丰富,油页岩累厚小,但单层厚度大,含油率高至6.9%,叶肢介丰富.

四川盆地侏罗系大安寨段发育陆相烃源岩,为厚层页岩(黄东等, 2018),广泛发育的淡水双壳类生物(介壳、叶肢介及介形虫)以及沉积大规模的介壳滩是大安寨段重要的沉积特征,叶肢介化石显示水体浅、低能静水环境,黑色的富含有机质的泥页岩发育,并见黄铁矿分布.厚刚福等(2017)通过化石发育与沉积相分析得出,整个四川盆地此时被介壳滩分隔成多个浅水水体.

除此之外,几乎陆相湖盆中高含气量页岩层中均能发现叶肢介化石,如梨树断陷(倪冬梅, 2021)、松辽青一段为I型,发育大量介形虫、叶肢介及植物碎屑化石(林铁锋等, 2021;丁聪等, 2021);十屋断陷、松辽盆地嫩江组油页岩,页岩发育,富含介形虫和叶肢介化石;重庆酉阳、巴南三叠系上统须家河组内植物、叶肢介和煤层(柳青青等, 2018);吐鲁番塔朗组烃源岩中含有叶肢介、双壳类及腹足类化石、塔朗组泥质碳酸盐类烃源层中鱼化石、双壳

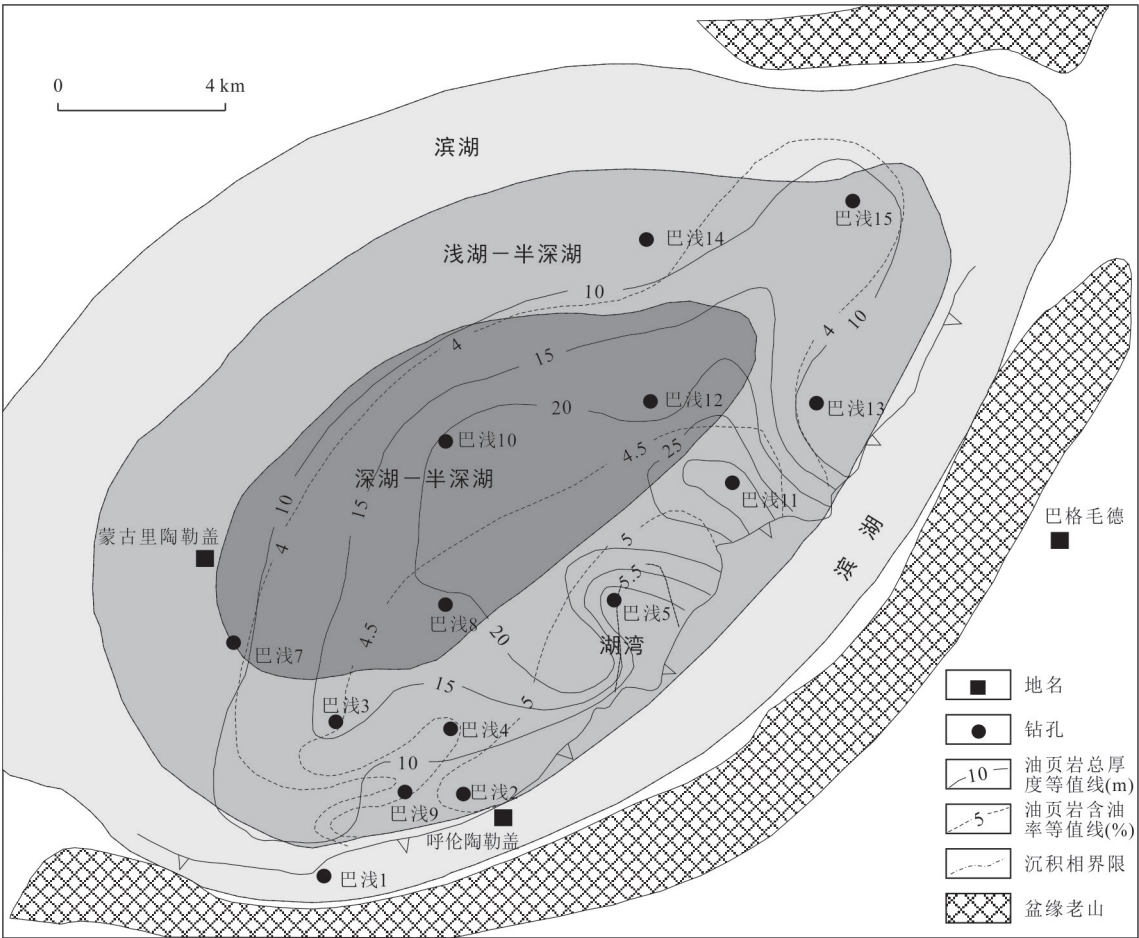


图1 银额盆地北部苏红图坳陷东北端下白垩统巴格毛德K₁b²油页岩分布

Fig. 1 Distribution of Bagmaud oil shale at the northeast end of Suhongtu depression in the north of Yin'e basin

据拜文华等(2010)修改

类(苗建宇等, 2004);准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组,湖相,含有鱼、叶肢介、双壳类等(高岗等, 2017);库车坳陷中侏罗统克孜勒努尔组(肖飞等, 2014);松辽盆地西缘、大兴安岭中南部地区林西组为陆相沉积建造,含双壳类、叶肢介、植物(张健等, 2013).甚至陆相碳酸盐岩烃源岩也同样富含叶肢介化石,如酒西盆地白垩统下沟组,赤金堡组湖相含有叶肢介(彭楠等, 2011)、孢粉体、壳屑体等化石(涂建琪等, 2012).

因此,叶肢介、双壳类化石的发育指示陆相含油气页岩层发育于极浅水环境,水深多数小于10~20 m.

1.2 页岩油气与煤具有相似的成矿模式

煤层主要发育于极浅水湖湾、沼泽、湿地环境.经典的成煤模式如图2所示(郭彪等, 2017),煤层发育从湖盆边缘向湖泊中心呈透镜状.越靠近盆地边缘煤层厚度越大,而逐渐向盆地沉积沉降中心尖灭,形成垂向叠置的多层煤透镜体,除非盆地处于发育晚期,准平原化阶段,出现沼泽化,煤层可能在盆地中心成矿,如图2中伊敏组.如果盆地边缘长期保持泥炭沼泽环境,则形成类似于图3的“马尾状”(黄铁栋等, 2011),向陆一端发育巨厚煤层,向湖盆中心尖灭.图3为探明储量位居我国第一,也是亚洲第一的吐哈盆地南缘沙尔湖煤田,发育巨厚煤层,剖面中部的古隆起区长期稳定,确保了左侧(北部)煤田主产区的沼泽环境,单层煤最大厚度达276 m.马尾状煤层的尾部白色部分为小规模湖侵,沉积砂泥岩,之后又逐渐淤平形成沼泽并成煤,呈现出多个旋回特征.当湖平面上升时,沼泽、湿地远离盆地向陆迁移;当湖平面下降时,则向盆地中心迁移,发育多期煤层.其中有重叠的部分,就是多期煤层呈连

续分布而形成的巨厚煤层.抚顺盆地古近系煤层也具有类似的“马尾状”分布(吴冲龙等, 2001),南部靠近盆地边缘为巨厚煤层,向北至盆地中心则厚度减薄.一套煤层或煤线就对应一个盆地中的局部低洼、低能、低水位环境.盆地发育时,一个地区的水体深度并不会一直保持不变.煤是一个重要的深度指示指标,只要有煤层出现,必然指示水体较浅的沼泽化阶段,可以作为一个深度指示器.如华北地区石炭纪—二叠纪的煤层,从北至南在同一时期会出现多个小型的局部封闭水体,在浅水碳酸盐岩沉积地层中穿插了多套垂向叠置的煤系地层,南部靠近盆地边缘煤层厚度大,向北至盆地中心变薄,也呈“马尾模式”(图4).

Dickinson(1976)很早就发现了油气的分布也存在类似现象,他根据美国内陆20个盆地的含油气情况得出,盆地离最近的前陆褶皱—冲断带的距离决定含油丰度,随距离增大,石油储量呈对数下降,但他推断这是油气侧向运移造成的.近年来,页岩油气的大量勘探实践说明,页岩油气的发育和煤有类似的规律,富有机质的页岩层分布由陆向深水水体方向成“马尾状”,以盆地边缘最为发育,向陆一侧厚,向湖盆中心一侧薄,如图5所示,为岐北斜坡区—岐口主凹烃源岩对比剖面(姜文亚和柳飒, 2015),从图中看出,优质烃源岩、厚层烃源岩的主要分布区并非盆地沉积中心.松辽盆地齐家—古龙凹陷西部油页岩厚度分布(陆军, 2017)也呈类似的规律,青山口组厚层暗色页岩出现在靠陆(西部)一侧,而越向湖盆中心则越薄至尖灭.结合前述银额盆地页岩油的分布可以看出,页岩气、页岩油和煤三者的分布模式在剖面上具有极高的相似度.

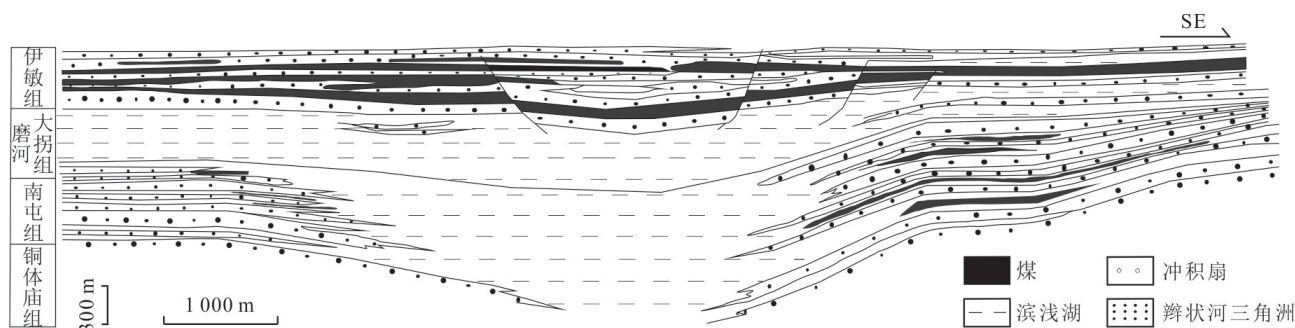


图2 伊敏凹陷东西向下白垩统沉积剖面

Fig. 2 East-west sedimentary section of Yimin sag

据郭彪等(2017)

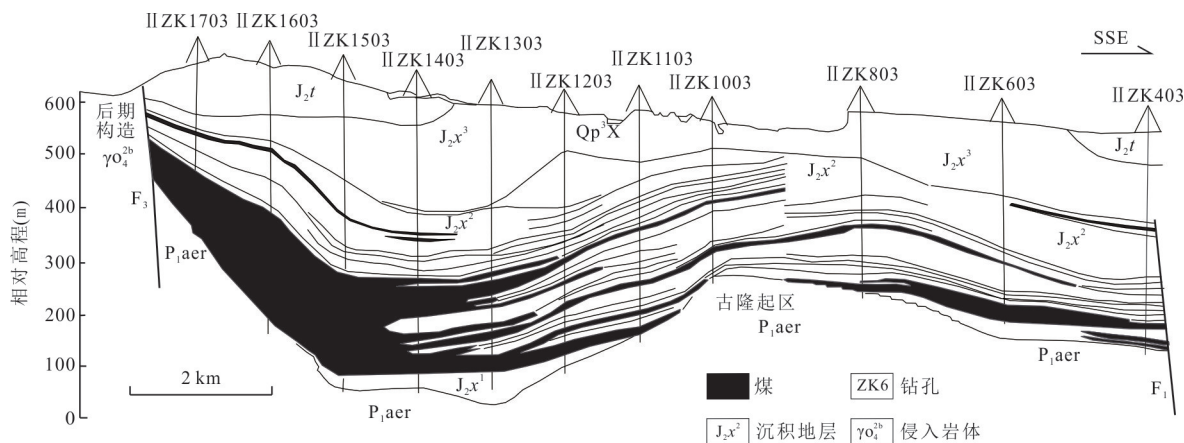


图 3 吐哈盆地南缘沙尔湖煤田东部侏罗系煤层剖面特征

Fig.3 Profile characteristics of coal seams in the east of Shaerhu coalfield on the southern margin of Turpan-Hami basin
据黄铁栋等(2011)

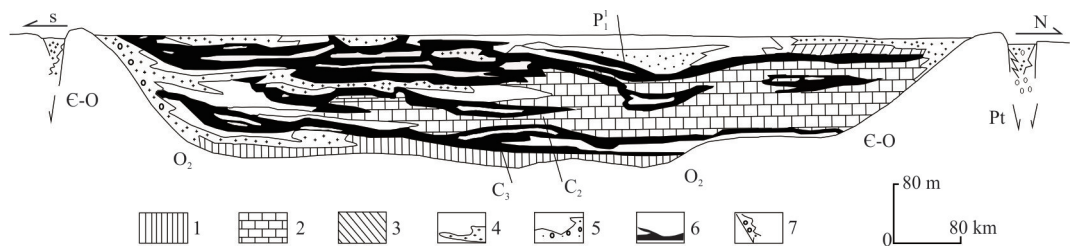


图 4 华北地区石炭—二叠煤盆地沉积—构造剖面示意图

Fig. 4 Sedimentary structural profile of Carboniferous-Permian coal basin in North China

1. 泻湖—滨海铁铝质沉积; 2. 泻湖—障壁含煤沉积; 3. 海湾、潮坪含煤沉积; 4. 浅水三角洲含煤沉积; 5. 冲积扇—河流含煤沉积; 6. 煤层; 7. 断陷盆地

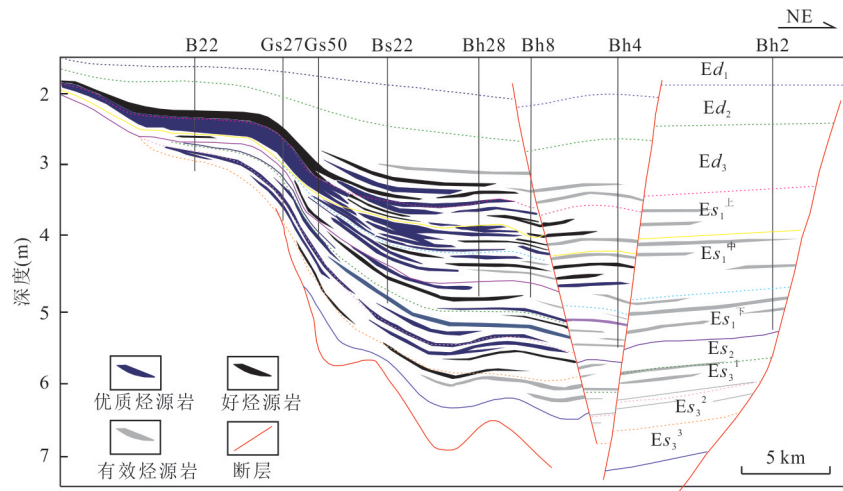


图 5 岐口凹陷古近系渐新统烃源岩对比剖面

Fig. 5 Correlation profile of Paleogene-Oligocene source rocks in Qikou depression
据姜文亚和柳颀(2015)

因此,页岩油气与煤具有相似的成矿模式,优质烃源层和煤层的出现具有同等的指示环境特征的标志,代表比煤层所发育的沼泽环境更深的低能、浅水海湾亚相(或间湾),而不是最大湖泛期所发育的较深水密集段或凝缩段,所处环境不是深湖—半深湖亚相。

1.3 页岩与煤、蒸发盐岩伴生

经典油气地质理论认为,细粒页岩沉积与煤层应具有截然不同的沉积环境,从河流沉积体系的沼泽亚相,至湖泊相的深湖亚相,中间跨越了多个相带,据此,煤层与页岩是不会直接接触的.但如果考虑湖泊相中的湖湾亚相,则在相序上它们之间是可以连续过渡的,具有伴生、直接接触关系.因为湖湾、间湾等浅水环境可以演化成沼泽;湖平面上升后,沼泽也能演化成湖湾,但深湖一半深湖亚相却不能直接演化成沼泽.有大量的实例说明页岩与煤、蒸发盐岩之间具有伴生关系.抚顺西露天矿的巨厚油页岩与含油率高达10%左右的下部长焰煤伴生,油页岩层的厚度达48~190 m,含油率也达6.6%(傅丛等,2021).重庆酉阳、巴南三叠系上统须家河组内有植物、叶肢介化石和煤层伴生(柳青青等,2018).此外,山东黄县盆地古近系(李丽等,2021)、黑龙江省的依兰盆地、老黑山盆地、抚顺盆地、广东茂名地区、吉林省桦甸和新安、青海柴达木盆地北缘鱼卡地区、内蒙古的东胜、甘肃兰州市郊的侏罗系窑街油页岩(李靖和秦荣芳,2018)、海南儋州中新统长坡组四段(郭敏等,2006)、新疆乌鲁木齐与昌吉地区、潍坊市昌乐县五图煤矿、内蒙金

宝屯矿区、甘肃永发县(炭山岭、永登、华亭)、陕西分平县永寿等都有油页岩与煤伴生现象.与煤伴生的油页岩矿床比单独的油页岩矿床更为常见,尤其是中生代以后的矿床更是如此,而晚古生代的伴生矿床相对较少(傅丛等,2021),这说明伴生现象具有普遍性.

王东东等(2016)系统地总结了陆相断陷盆地煤与油页岩共生的5种组合特征,得出煤和油页岩中均含有高等植物和藻类;从滨湖到湖中心,共生组合中煤层厚度逐渐减小.在煤与油页岩共生组合中,靠近煤层的油页岩中高等植物组分含量较高;靠近油页岩的煤层中,低等植物(藻类)的含量也较高,表现为富氢化,反映了煤与油页岩之间的转换是连续的,而非突变,进一步证明二者具有亲缘性,并可类比.

油页岩还与蒸发盐、煤三者共生,如河南桐柏盆地始新统五里堆组,油页岩与蒸发盐互层(图6);美国绿河盆地为油页岩、蒸发盐、煤三者互层,辽宁抚顺盆地为煤与油页岩共生,进一步演化至西露天组为蒸发性白云质泥岩(许圣传等,2012);羌塘盆地胜利河组、东营凹陷沙四段、江汉盆地小板凹陷潜江组为膏盐与油页岩互层(李乐等,2019),更加

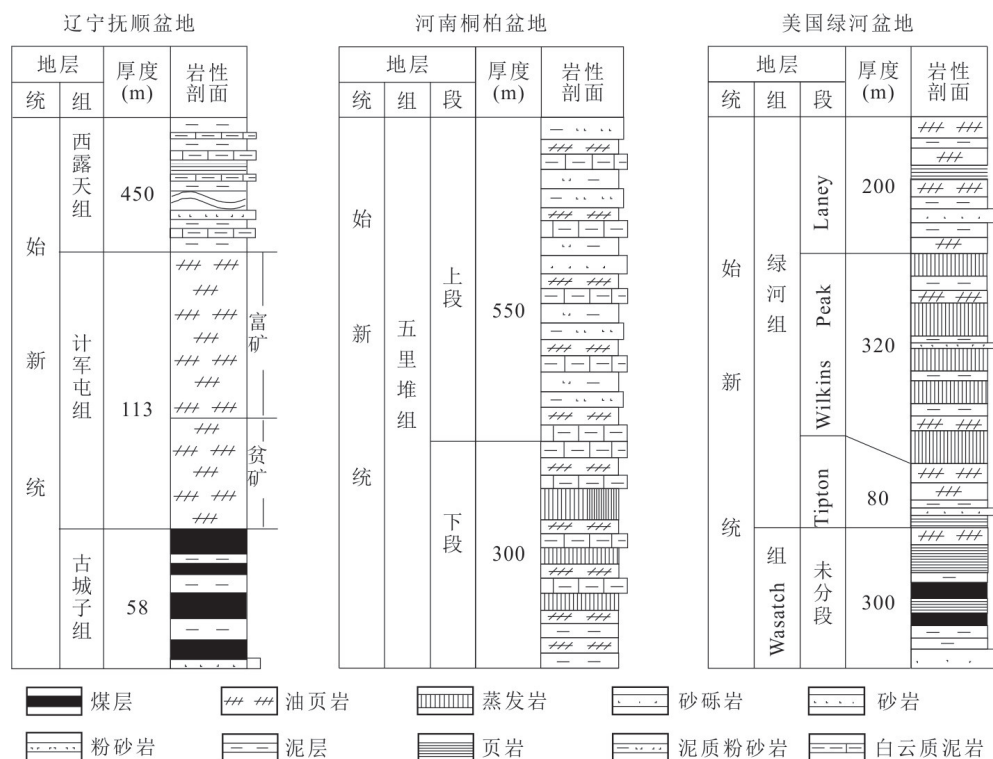


图6 页岩层与煤、蒸发岩共生现象

Fig. 6 Symbiosis between shale and coal and evaporite

据许圣传等(2012)

说明页岩的发育与这些浅水环境是渐变关系,并非截然不同的环境。

因此,油页岩与煤、蒸发盐伴生的较普遍的现象说明浅水环境更有利于有机质富集。

1.4 初级生产力、固碳速率与水深的关系

初级生产力对于最终的碳储影响较大,它决定了次级生产力、碳汇速率和碳储(固碳)速率等,这一过程包含生产、消耗、分解、运移、贮存。当生产力远大于分解、消耗时,则有可能富有机质;而生产力低时,即使是强还原环境,仍不可能富集有机质。在陆地上,唯一能在一定氧化条件下富集有机质的,只有带一定潮湿度的沼泽环境,其有机质分解速度远低于生产速度,泥炭富集形成碳汇,在消耗一定有机质后,形成碳储,最终变质成煤。Jun *et al.* (2022)通过实验研究认为,博格达山脉北麓地区的油页岩的主要有机质丰度受湖泊生产力的控制,生物的保存条件对油页岩质量影响不大;Calvert *et al.* (1993)认为高生产率是主导因素。为此,本文对初级生产力等多种过程在垂向和平面上的特征

进行了分析。

1.4.1 初级生产力与固碳的垂向特征 湖泊中的初级生产力与水温、光线强度、溶解氧、叶绿素浓度等成正比。溶解氧在10~20 m湖水深度处将降低至浅层水的1/3~1/4,几乎等于缺氧状态,属浮游植物衰减区,30 m以下,浮游植物含量单调下降(图7a);叶绿素受溶解氧、光线强弱的影响较大,叶绿素浓度随深度呈指数下降趋势,水深0 m约为45 mg/L,10 m处约为15 mg/L,50 m处约仅为5 mg/L(吴锋等,2012)。俞焰等(2017)研究了千岛湖东南部新安江大坝附近的水环境,温度、溶解氧、浮游植物和浮游动物,水温从湖面的25℃迅速降至水深40 m处的10℃;浮游动物在10~20 m有一个高峰,之后单调下降,在50 m深处,几乎绝迹。

据其垂向分布规律,可以计算湖泊初级生产力,高峰在水深15 m左右(Tait, 1981),超过补偿深度(约50 m)之下就没有净生产力了,只有消耗,没有生产,如图7b所示。

水体中的有机碳包含溶解有机碳(DOC)和颗

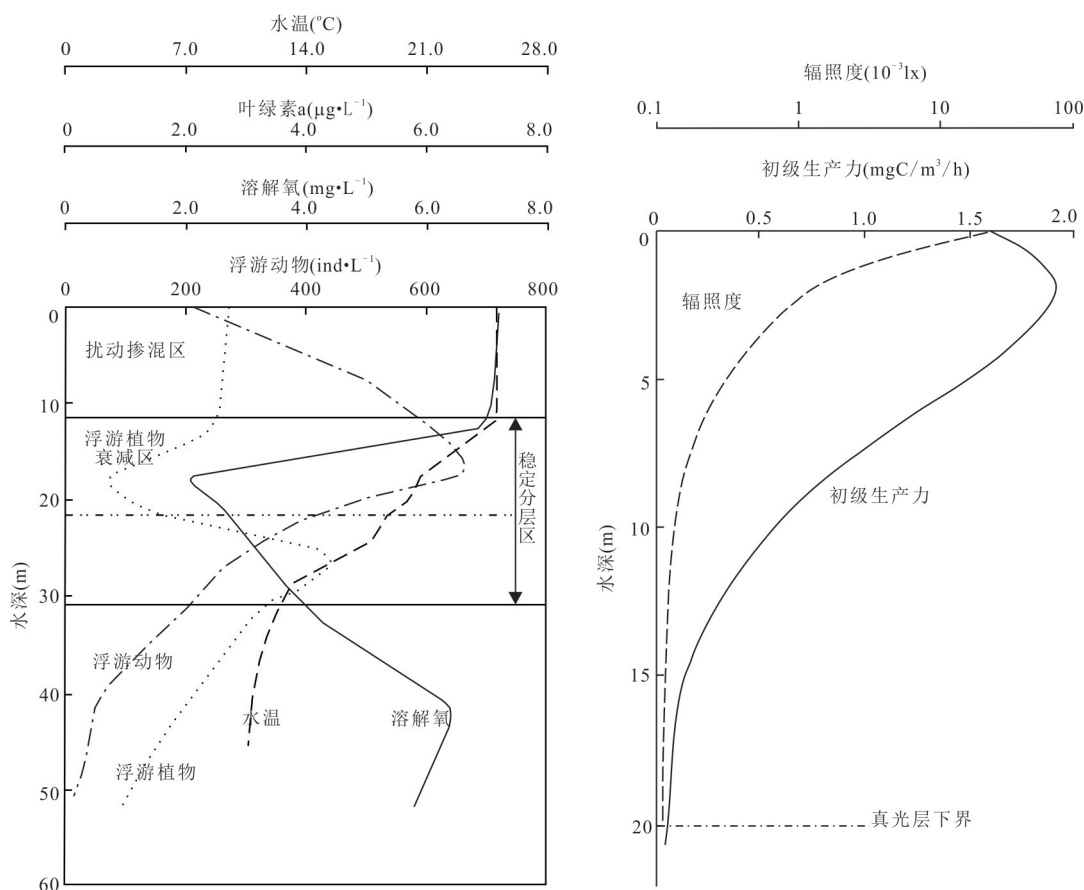


图7 湖泊溶解氧和初级生产力随水体深度的变化

Fig. 7 Vertical distribution model of dissolved oxygen and related factors in Qiandao Lake area

a. 湖泊溶解氧与相关因子垂向分布; b. 初级生产力. 据俞焰等(2017)及费尊乐等(1988)

粒有机碳(POC),其中,对固碳有贡献的是沉降至湖底或海底的POC(也称沉积通量)。在真光层浮游植物通过光合作用产生了大量的POC,在POC向下沉降过程中,随着深度的增加,不断地被浮游动物摄食和微生物分解(Boyd and Newton, 1999)。Van Mooy *et al.* (2002)在热带太平洋东北部使用小的圆柱形沉积物捕捉器所获得的POC在不同深度的通量发现,在130 m水层,POC的通量为 $123.6 \pm 94.8 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,在480 m其通量下降为 $44.4 \pm 7.2 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,下降了近1/3,所以,迄今为止,没能在海水深度 $>4 \text{ km}$ 的远洋洋壳上发现油田,也缘于此。国际大洋发现计划(IODP)对大洋洋壳进行了大量钻探,同时也获得了总有机碳含量(TOC),平均 $\text{TOC} < 0.52\%$,极少超过 1.0% ,如第351航次在西太平洋菲律宾海东部4 700 m水深的U1438号

场地钻探1 461 m厚的沉积物,TOC平均为 0.25% (Arculus *et al.*, 2015);344航次在北美南部太平洋水深2 km处钻探中,因靠近大陆边缘,沉积物TOC含量较高,为 $1\% \sim 2\%$ (Baxter *et al.*, 2013)。

因此,是否是深水、深海还原环境,并不重要;浅水水体中的POC能快速沉降到湖底,即使不是强还原环境,仍有碳储。从图7a可以看出,在水深15 m左右会出现一个溶解氧的“黑障区”或称氧跃层—浮游植物衰减区,该区域溶解氧只有 2 mg/L ,为水面至10 m深 7 mg/L 的1/3;抚仙湖20~30 m水深溶解氧最低 4.5 mg/L ,而40~140 m则缓慢增加至 6.4 mg/L (周天旭等, 2022);而海洋环境在1 000 m深度溶解氧最低值为 $2 \sim 3 \text{ mg/L}$ (李鹤等, 2017)。

综上,初级生产力和固碳速率的垂向特征说明,在15~20 m水深处是溶解氧最少的强还原环

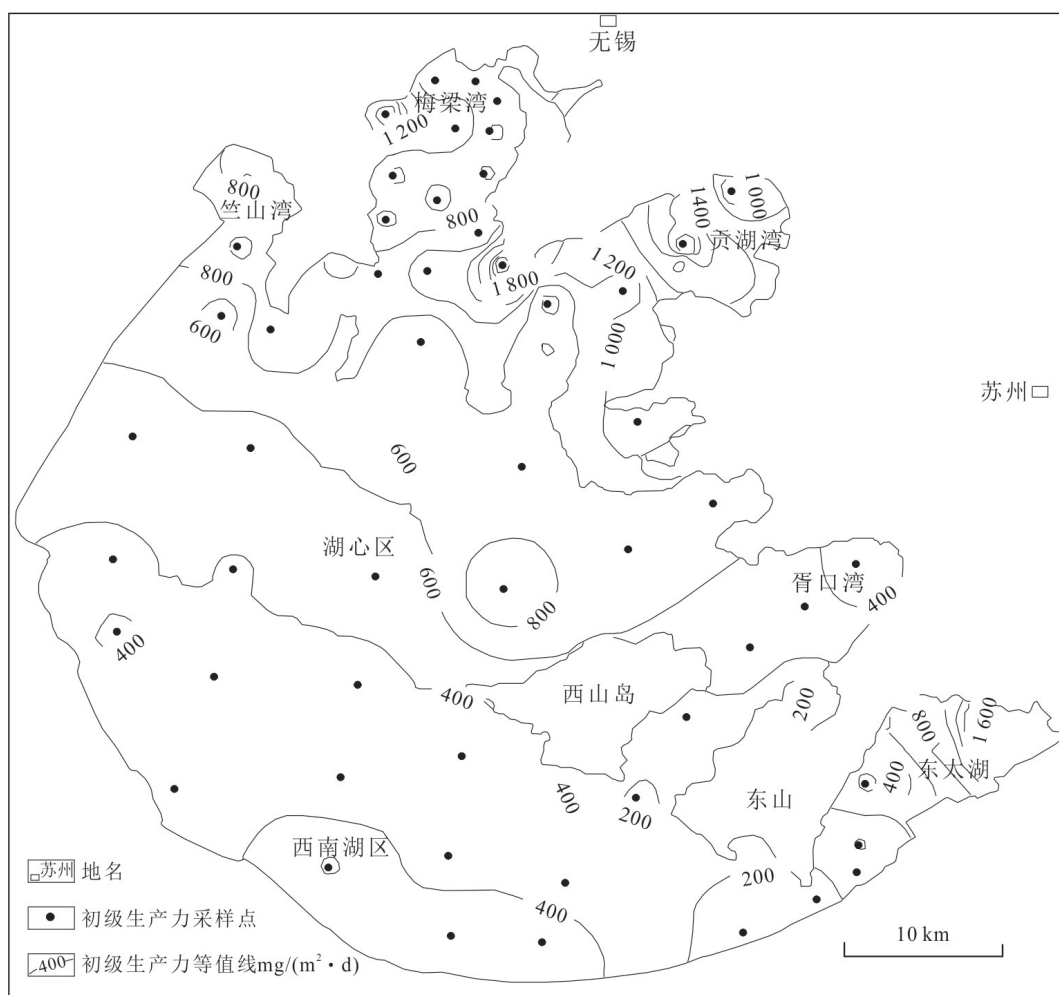


图8 太湖初级生产力空间分布(单位: $\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)

Fig. 8 Spatial distribution of primary productivity in Taihu Lake

据张运林(2008)修改

境,较浅的水体是陆相湖盆有机质生产和保存的必要条件.

1.4.2 初级生产力与固碳的平面特征 在平面上,也因环境不同,初级生产力差异较大.陆地及沼泽环境平均达到 $285\text{ mgC}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,其中热带森林地区可达 $730\sim1\,095\text{ mgC}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,但陆地除沼泽外,均在强氧化条件下,不利于有机质保存,而湖泊、海洋的初级生产力只有 $54\text{ mgC}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$.太湖北部和东南的湖湾地区的生产力,是开阔湖面的2~10倍,均值在4倍以上(张运林等,2008),如图8所示;我国海区凹岸一侧浅水区(深度 $<50\text{ m}$)的生产力,比水深大于 120 m 的海域生产力大10倍以上.Yukio and Yoshimi (1988)研究了我国东部及日本南部海域的溶解有机碳分布得出,溶解有机碳 DOC 在远洋低,近海 $484\text{ }\mu\text{mol}$,远洋 $188\text{ }\mu\text{mol}$,这说明水体的有机质主要来源于陆地.

有了高的生产力,按比例就会有高的固碳能力.

在固碳方面,本文统计了我国主要湖泊水体固碳(碳汇)能力与温度、湖泊面积的关系(资料主要来自段晓男等,2008).固碳速率为考虑了生物自身消耗、氧化分解因素的后有机质可保存在沉积物中的效率,如图9和表1所示,发现面积越小的湖泊,固碳速率越高.面积越大,湖面越开阔,固碳速率低,高低数值相差5倍,得出湖泊固碳率与面积呈反比关系,和Ferland *et al.* (2012)的结论一致. Downing *et al.* (2008)对美国爱荷华州40个小型农业池塘的研究表明,富营养化的农业池塘有机碳埋藏速率很高,比自然湖泊或大型水库的有机碳埋藏速率高1到2个数量级,并推测全球池塘的有机碳埋藏量比海洋还大.其本质有可能是面积越大,陆源有机碎屑供给少;而面积越小,湖岸弯曲度大的区域,或湖湾区,接受陆源有机质也多,因而固碳速率越高. Liu *et al.* (2023)研究了柴达木盆地大煤沟组陆相页岩有机质的来源,得出陆生植物占主导地位.另一

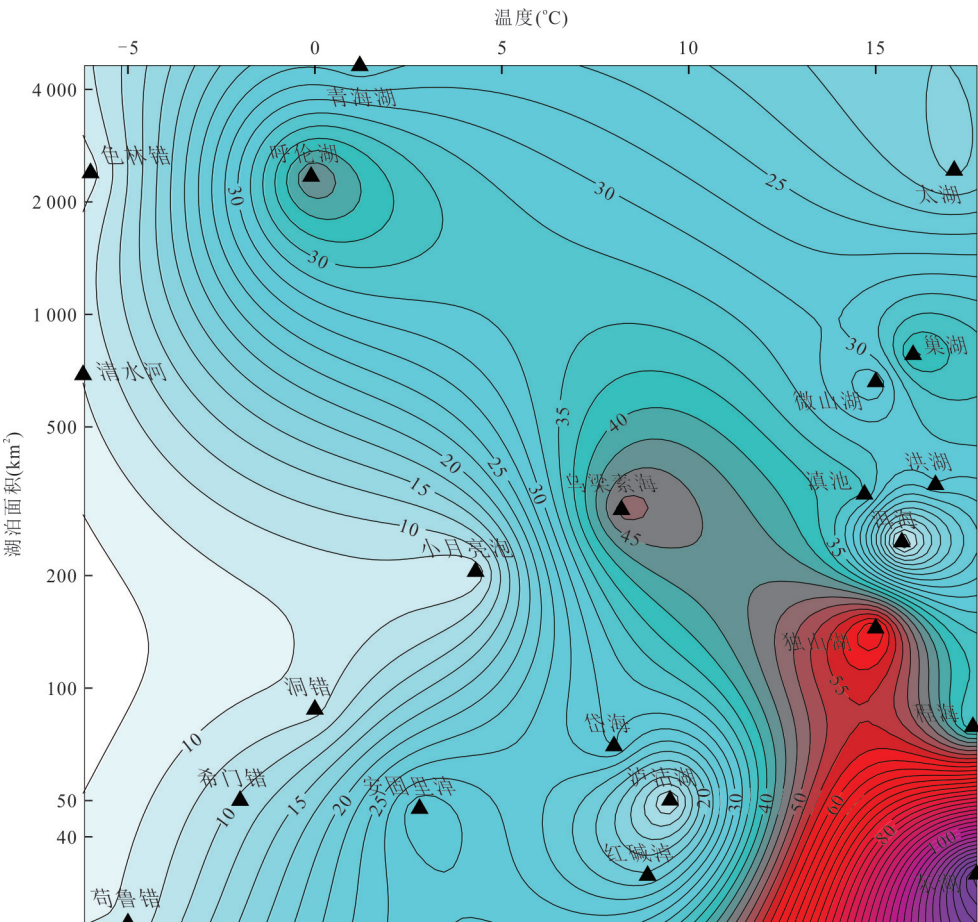


图9 我国主要湖泊水体固碳速率与温度、湖泊面积的关系平面图(单位: $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$)

Fig. 9 Plan of the relationship between carbon sequestration rate, temperature and lake area of major lakes in China (unit: $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$)

表 1 我国主要湖泊固碳速度与年平均气温、湖泊面积的关系

Table 1 Relationship between carbon fixation rate of main lakes and annual average temperature and lake area

湖泊名	固碳速率 (g/(m ² ·a))	水深 (m)	海拔 (m)	年平均气温(℃)	面积(km ²)
独山湖	63.71	1.50	32	15.0	144.61
微山湖	24.91	3.00	32	15.0	660.00
洪湖	29.81	1.35	25	16.6	350.00
巢湖	40.78	2.89	15	16.0	780.00
太湖	16.82	1.90	62	17.1	2 427.80
东湖	129.36	6.00	20	17.7	31.75
乌梁素海	48.84	1.00	1 021	8.2	300.00
岱海	30.33	7.00	1 220	8.0	70.00
青海湖	22.95	21.00	3 196	1.2	4 625.60
呼伦湖	45.43	5.70	546	−0.1	2 339.00
红碱淖	20.45	15.00	1 242	8.9	31.51
安固里淖	32.21	3.00	1 312	2.8	47.60
滇池	35.43	5.00	1 886	14.7	330.00
泸沽湖	6.60	40.30	2 690	9.5	50.10
程海	34.80	25.74	1 622	17.6	78.80
洱海	3.48	10.50	1 972	15.7	246.00
洞错	6.47	68.70	4 396	0	87.70
苟鲁错	5.60	1.30	4 666	−5.0	23.50
色林错	3.85	33.00	4 530	−6.0	2 391.00
希门错	10.47	40.00	4 020	−2.0	50.00
清水河	5.12	15.00	4 480	−6.2	689.00
小月亮泡	5.47	4.70	125	4.3	205.00

个可能的原因是,湖盆中心深湖一半深湖地区的开阔湖面,表层水体受波浪作用影响,水动力强,浅层水体的有机质在形成与沉降过程中被大量分解,因而固碳速率不高.因此,用排除法,在低能环境中,只剩下湖湾亚相最有可能富含有机质了.

1.5 有机质类型

前述推论可能存在一个疑问,如果是浅水环境,那么页岩中的有机质应该是 III 型或 II 型为主,那如何解释很多页岩层是 I 型的?这其实是个误解.为此,本文统计了我国主要陆相湖盆页岩地层有机质类型及含气量,如表 2 所示.从表中看出,陆相页岩有机质类型为 I 型的并不多,主要是 III 型和 II 型.即,从页岩层有机质类型上看,和本次研究所提出的观点并不矛盾.

表中有 3 个地区陆相页岩有机质类型为 I 型,具体情况如下.(1)松辽盆地青一段,发育大量介形虫、叶肢介及植物碎屑化石(林铁锋,2021)、介形虫和壳类化石(郑国栋等,2020).叶肢介化石、植物碎屑化石这些均指向浅水封闭环境;(2)济阳坳陷,沙一

段和沙三下段为 I 型,其中沙一段大量发育遗迹化石,为无脊椎动物线虫、节肢动物、环节动物和腹足类等形成的牧食迹和进食迹,发育于富氧的低能湖泊环境的细粒软底沉积物中,代表稳定的环境条件,通常沉积速率较低(施振生等,2005).低能、稳定环境不能是开阔湖区,富氧指示为浅水环境;(3)泌阳凹陷核桃园组,发育大量遗迹化石,含 5 个遗迹组合:稍有覆水并周期性暴露的低能滨湖环境;湖泊中上临滨环境;与低能浅湖环境有关;浅湖的远源风暴沉积;贫氧的深水环境(齐永安等,2007),前 4 个组合均为浅水环境.

1.6 地球化学证据

为了说明黑色页岩来自于深湖环境,目前主要用铁锰含量比例作为主要依据并认为该比值越小,水体越深,已应用于多个盆地(张永生等,2003;王春连等,2012;李浩等,2017).事实上,这些认识主要来源于刘平略等(1986)和邓宏文(1993)的成果,前者只是提到了浅湖和半深湖锰/铁比例偏高,未提到深湖亚相;而后者认为,Mn 在半咸水—咸水的间歇性

表 2 我国主要陆相页岩地层有机质类型及含气量统计

Table 2 Statistics of organic matter types and gas content in continental shale formations

盆地名称	层位	含气量 (m ³ /t)	有机质类型
鄂尔多斯盆地	长 7	1.60~4.95	II
	长 9		II
松辽盆地	松辽盆地青一段	0~4.5/2.0	I - II
	营一段		II ₁ -II ₂
	松辽盆地青二、三段		II
济阳坳陷	济阳坳陷沙一段		I - II ₁
	济阳坳陷沙三下亚段		I - II ₁
	济阳坳陷沙四上亚段		II ₁
辽河坳陷	辽河坳陷沙三段	2.74~5.58/4.37	II ₁
四川盆地	侏罗系自流井组	1.35~1.66	腐泥型,腐殖—腐泥型
	大安寨二亚段	0.78~5.8/4.31	II ₂
	千佛崖组二段	0.68~5.69/3.53	II ₁ 、II ₂
	东岳庙段	0.47~4.82/2.27	II、III
	须家河三段	0.98~41.81/11.31	II ₂ 、III
	川东北地区大安寨段	0.87~1.98/1.49	II ₂ 、III
	川西坳陷	1.37	III型,少量II ₂ 型
	川北川东北川中一带	1.28	III型,少量II ₂ 型
	川东北地区大安寨段	0.87~1.98/1.49	II ₂ 或III型
阜新盆地	沙海组和九佛堂组	0.5~2.5	II ₂ 型
	阜新组	1.5	III型
南襄盆地	泌阳凹陷下侏罗统	1.35~1.66	混合—腐殖
	泌阳凹陷核桃园组	2.5~6.1	I - II ₁

闭塞一半封闭湖相泥质岩中含量最高,故 Fe/Mn 可以作为离岸距离(或水深)的标志,Fe/Mn 数值最小时是封闭、半封闭的湖湾环境,而未明确指出一定是深湖环境.松南伏龙泉 SL3 井沙二段页岩层的 Fe/Mn 数值在所有层系中最小(李浩等,2017),反映它处于封闭的环境,或咸化环境.地球化学证据说明了 SL3 井页岩是水体较封闭的环境.此外地化指标 Mo、Pr/Ph、Th、U、Th/U、Rb/K 等可以反映水体的氧化还原状态,从而间接揭示溶解氧的含量.然而溶解氧随水体深度增加不是单调降低,因而目前没有较好的地化指标能直接反映出水体深浅.

综合上述证据,我们可以得出结论,大多数陆相页岩富有机质层段发育于这种浅水湖湾等局限环境,局限环境是有机质富集的充分条件.

2 富有机质页岩发育环境的验证

本文利用上面的思路,研究了松辽盆地几个断陷及鄂尔多斯南部陆相页岩层中有机质富集规律,

验证了富有机质页岩发育于湖湾环境的结论.

2.1 松辽盆地南部梨树断陷

松南梨树断陷下白垩统营城子组一段和底部沙河子组二段为该地区主力烃源岩,发育黑色泥页岩、深灰色泥岩,富含叶肢介化石,干酪根类型为 II 型、III 型.营城子组一段内部可见大量的叶肢介化石及高等植物残片分布(倪冬梅,2021).如图 10a,10b 所示,为梨树断陷西北部苏家屯地区 L1 井营一段所观察到的叶肢介化石.苏家屯地区相对于整个梨树断陷而言,在早白垩世是一个半封闭的湖湾环境,被苏家屯东部北东—南西向的古隆起分隔成一个宽度 5~6 km 的半封闭湖湾(图 11),并富含有机质.从图 11 沙河子组二段 TOC 平面分布图来看,东部的 L2 井也为半封闭湖湾环境.该井也有较好的页岩气显示,发育浅叶肢介化石(图 10c).从图中还可看出,梨树断陷南部 S1 井区,东北部的 S167、S119、N2 井区各自形成封闭或半封闭的湖湾,并富含有机质,垂向运移到营城子组顶部砂体形成常规油气藏金山气田、十屋油田、七棵树油田及双龙油田.

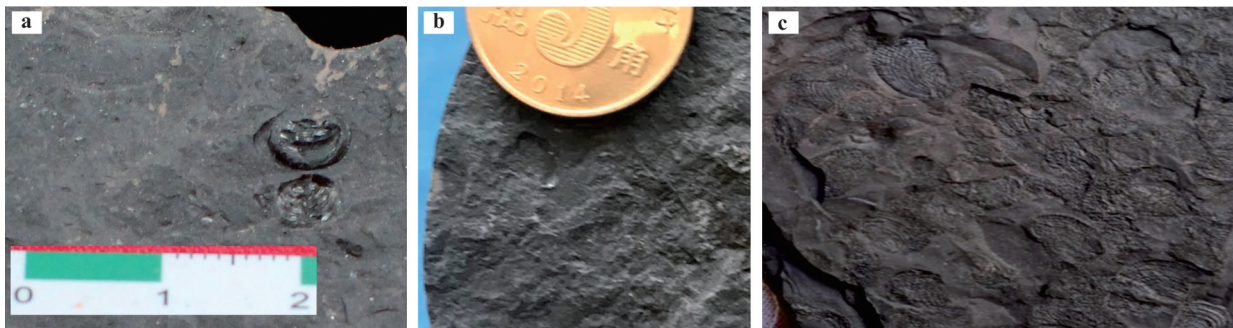


图 10 梨树断陷下白垩统营一段叶肢介化石

Fig. 10 Leptopoda fossils from Ying-1 Member of Lower Cretaceous in Lishu fault depression

a. L2井,3 165.67 m; b. L2井,3 146.21 m; c. L1井,3 241.15 m

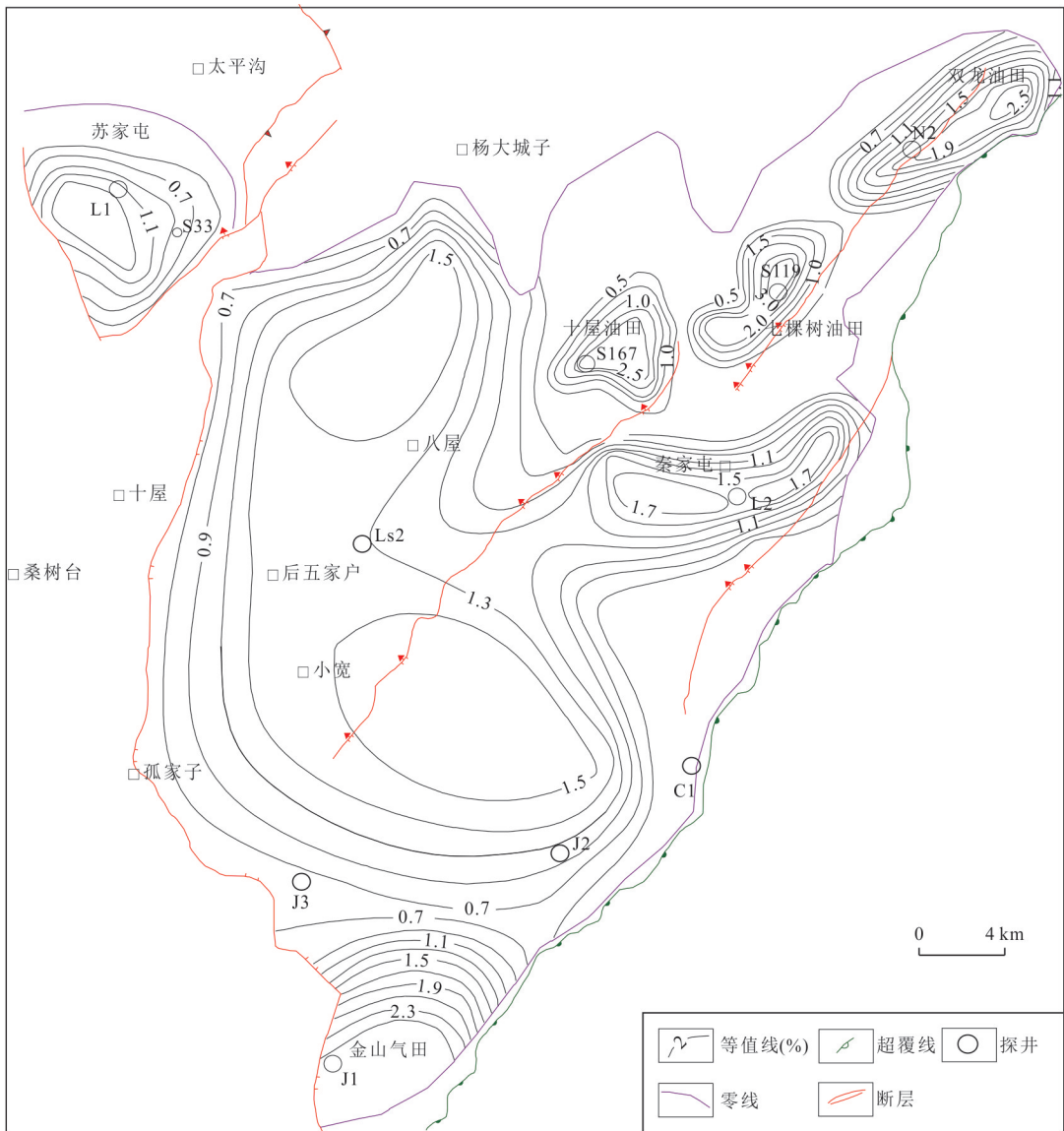


图 11 松辽盆地南部梨树断陷沙河子组二段烃源岩 TOC 分布平面图

Fig.11 Total organic carbon (TOC) distribution of source rocks in the second member of Shahezi Formation in Lishu fault depression, southern Songliao basin

2.2 龙凤山断陷

离梨树断陷不远同属于松南断陷的龙凤山地区沙河子组页岩也发育代表浅水环境的叶肢介化石,有机质丰度与沉积中心的关系如图 12 所示.更靠近湖盆地中心的 B203、B208 井的沙 2-2 段为含多套砂泥互层,如图 13 所示,其中砂体并非滑塌或重力流沉积,而是从西南侧翼进积过来的三角洲前缘或前三角洲,这种快速的物源供给,会使其中的泥岩有机碳含量偏低;而其东南部靠近湖盆地边缘的 B217、B216、B212 井,发育厚层富有机质的页岩层,显然它与北部的深湖一半深湖地区不同,是一个半封闭的湖湾,为浅水低能环境.如前所述与之相邻的伏龙泉地区 SL3 井的沙二段页岩的 Fe/Mn 数值较小,代表了其环境为半封闭的湖湾而非深湖环境.

2.3 齐家古龙凹陷油页岩

大庆西部的齐家—古龙凹陷青山口组产页岩油,其中,青一段、青二段发育厚层油页岩,青二段下部到青一段整体含油,干酪根类型为 I 型,目前几乎一致认为它为深湖相沉积(孙龙德等, 2021; 崔宝文等, 2021; 林铁锋等, 2021). 表面上看,从青一段到青三段整体上向上为一个粒度变粗的过程,但也是水体变深的过程,具体证据如下:

(1)青山口组页岩有机质丰度 TOC 分布与沉积中心不一致.高 TOC 分布范围在三肇凹陷至朝阳沟地阶盆地边缘较浅的地区,远离大庆以南的沉积中心(崔宝文等, 2021; 武田田等, 2022).

(2)泰康北的青二、青三段海绿石发育(邢顺淦

等, 1982),指示为深水环境.海绿石发育于开阔的深水湖泊环境,如在抚仙湖现代沉积物中,海绿石分布在 35~150 m 的湖底表层(王云飞, 1983),位于深湖一半深湖.青一段不发育海绿石.

(3)硅质页岩富铀,黏土页岩贫铀(杨洋等, 2021).由三角洲进积而快速充填(淤浅)的深湖则为硅质含量高的岩石,缺有机质,富铀;而湖湾地区为黏土页岩,TOC 高,贫铀.如松辽盆地西南部白垩系姚家组的暗色泥岩含铀高达 299×10^{-6} , $TOC < 0.4\%$ (江文剑等, 2022),为非烃源岩;青二、青三段含硅质,相对富铀(卢胜军, 2022),而青一段则贫铀,TOC 高.

(4)青一段类型是 I 型,但发育大量介形虫、叶肢介及植物碎屑化石(林铁锋等, 2021),这些均为浅水环境的证据.从前述生态学角度看,对于滞水(局限)湖湾环境,水深 0~20 m 的初级生产力最高,在这样的浅水环境也可以发育 I 型有机质并保存下来.

(5)从齐家—古龙凹陷西部富有机质页岩发育剖面看,靠近湖盆西部边缘页岩厚度大,而越靠近湖盆中心厚度越小(陆军, 2017),具有典型的马尾模式.

(6)青一段为 I 型干酪根并不代表它一定需要处于深湖强还原环境.SL-1 井青一段页岩地化指标 Mo 含量、Pr/Ph 值等显示其沉积环境为弱还原—氧化环境(王岚等, 2019).从前述水体中溶解氧的垂向分布看(图 7),在浅水湖湾环境下从强还原环境

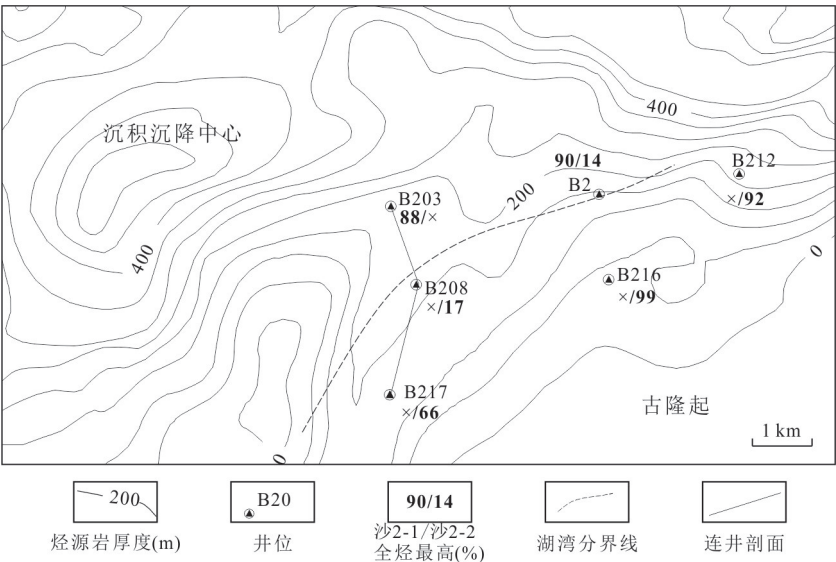


图 12 龙凤山断陷烃源岩厚度平面

Fig.12 Thickness plan of source rocks in the Longfengshan fault depression

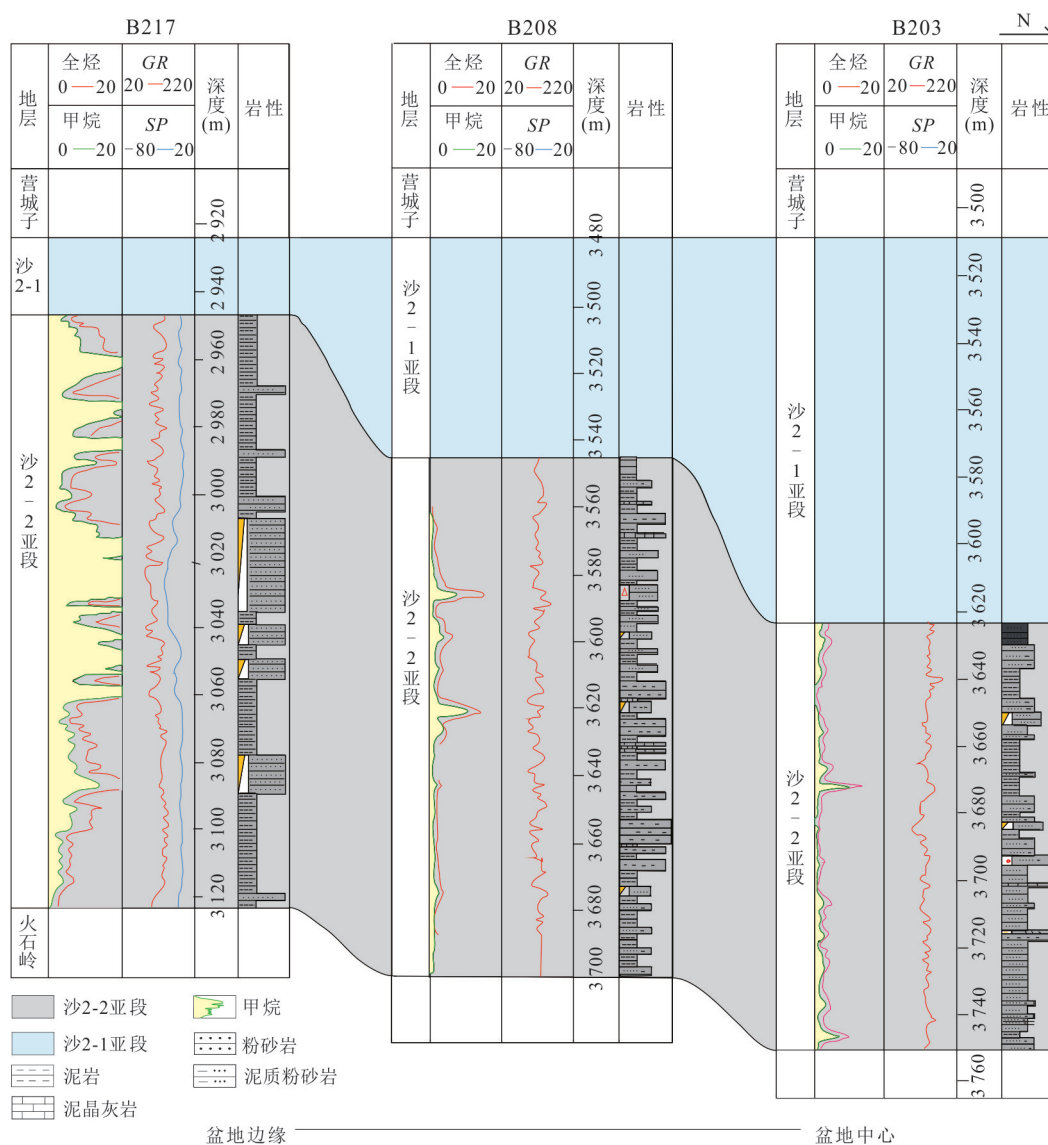


图13 B217-B208-B203连井剖面

Fig.13 B217-B208-B203 Well profile

到氧化环境均可出现,因此,并非浅水湖湾一定是氧化环境而不利于有机质保存。

2.4 鄂尔多斯盆地南部

鄂尔多斯盆地南部三叠系延长组长7油页岩发育叶肢介化石,属浅水湖湾亚相环境(拜文华等, 2010)。如图14所示,坡折带以下的深湖地区,化石少,油页岩薄,含油率低;而坡折带之上的浅水地区,化石丰富,含叶肢介等双壳类化石,油页岩单层厚度大,含油率高,如图14d所示,也同样具有马尾模式。本文通过小尺度的埋藏史恢复,按沉积等时线精细模拟,发现这里所指的坡折带只是按现今构造形态来定义的。在页岩层发育期,这个斜坡带右侧有一个局部负地形,且长期发育,和前述湖湾古

地貌一致(图14a~14d)。里1与庙37井之间的砂体应是分隔深湖与湖湾的障壁(前人解释为浊积砂),即此处并非坡折带,而是湖中低凸或坝隔离了开阔的主体湖泊。由此给勘探研究一个重要启示,页岩的沉积环境分析,不能以现在所在盆地的部位,来判定其当时的沉积环境,需要进行古水深、埋藏史、构造史恢复,才能准确把握其古环境。

3 结果与结论

(1)页岩中的化石及有机质类型支持陆相页岩层发育于浅水湖湾环境。大量发育的指相性化石叶肢介表明水体极浅,其最适宜的深度仅20 cm;有机质类型主要为II型和III型,化石中含植物碎屑表明

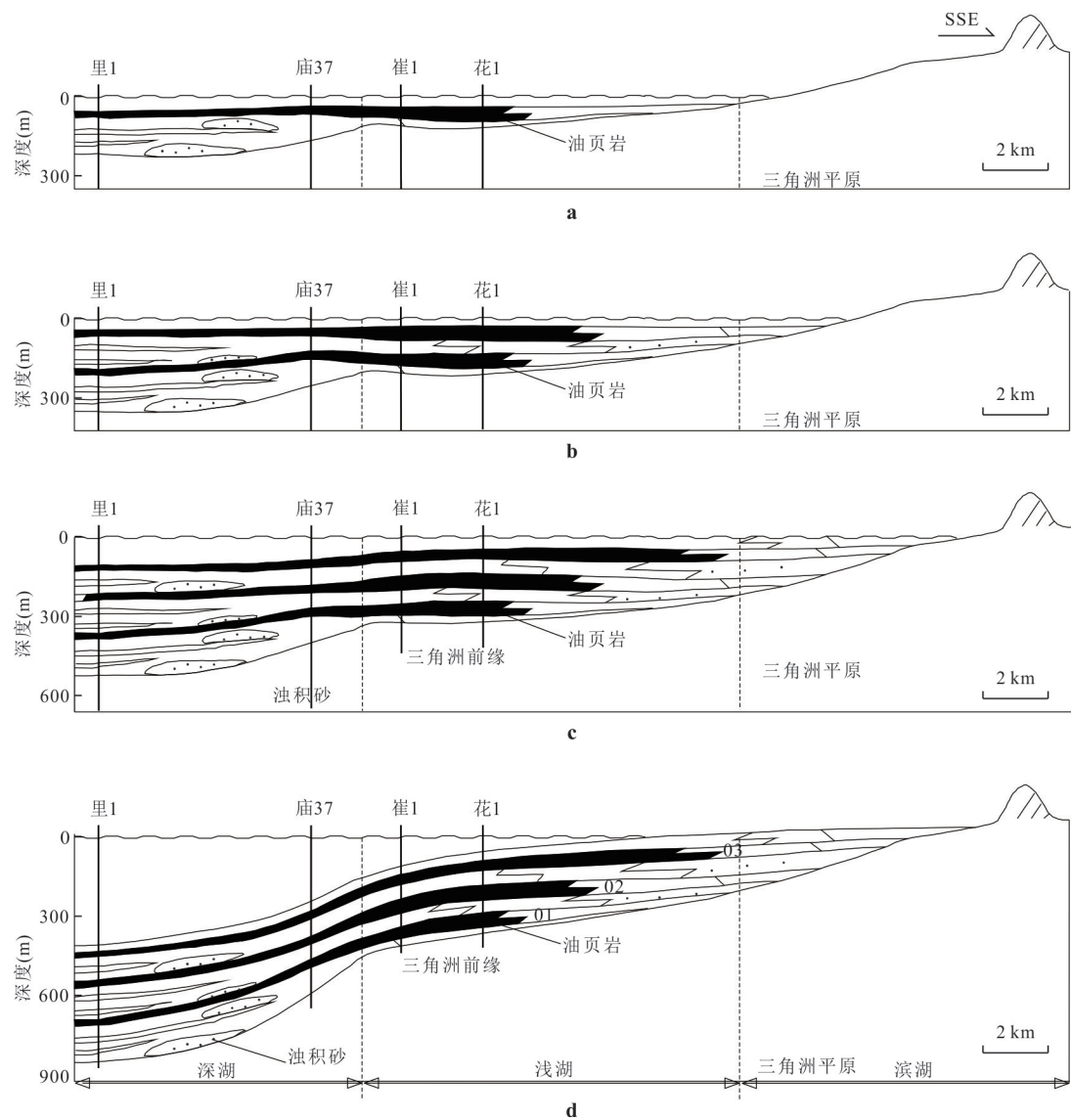


图 14 鄂尔多斯盆地南部三叠系延长组长 7 油页岩对比及构造发育剖面图
Fig. 14 Triassic Yanchang 7 oil shale correlation and structural development profile in southern Ordos basin
a. 油页岩 $T_3Y_3^{1-1}$ 沉积末; b. $T_3Y_3^{1-2}$ 沉积末; c. $T_3Y_3^{1-3}$ 沉积末; d. 长 7 段沉积末

存在大量陆源有机质供给。

(2)初级生产力和固碳速率在浅水环境远大于在深水环境,且越靠近陆地一侧越高;煤的成矿模式说明了当初级生产力远大于有机质分解的速度时,烃源岩是否处于氧化还原环境并不重要。水体越深不一定处于更强还原环境。在 0~20 m 的浅水湖湾环境,氧化—弱还原—还原—强还原环境均有可能出现。

(3)页岩与煤、蒸发盐岩不是截然不同的沉积环境,在很多盆地都有共生互层关系,是环境的渐变而不是突变接触;页岩油气与煤有相似的成矿模式,均具有马尾模式,向陆地一侧厚,越向盆地中心越薄,均证明了与陆地一侧浅水环境有关,也说明

了页岩层的发育和煤一样,具有浅水、封闭一半封闭环境的指示层。

据此得出以下结论:

(1)最大湖泛期的凝缩段(密集段)或深水环境贫有机质。

(2)陆相页岩层有机质最富集的层段发育于湖湾、沼泽等封闭一半封闭水体;每一套页岩油气层的发育意味着盆地此时处于浅水环境,和煤一样,是一个水体深度或环境指示标志。盆地真正的深水区多数情况下是被不含或贫有机质的细砂、泥质等陆源碎屑快速充填,故不能完全以粒度大小区分沉积环境。

(3)页岩地层富集有机质的必要条件是位于较

浅的水体,而充分条件是水体为封闭或半封闭的环境。

(4)梨树断陷、龙凤山断陷富有机质页岩发育于湖湾环境,说明了本文观点具有普适性。

该认识对于我国陆相页岩油气勘探具有重要的意义,可以很具体地指出页岩油气甜点。建议在陆相盆地的“斜坡”带上,经精细、小尺度、小层埋藏史分析,以浅水、局限水体环境为线索,寻找可能存在的古湖湾、间湾、沼泽等滞水、低能环境,作为陆相页岩油气勘探的首选目标;在页岩油气资源评价中,也应将水体深度及封闭性作为重要指标。

致谢:感谢中石化东北分公司及中石化无锡石油实验地质研究所提供了资料支撑,感谢论文评审专家给出了很详细、很具体的修改意见,也感谢中国地质大学(北京)张金川、肖建新等教授,中国石油勘探开发研究院刘银河教授提供了很好的修改意见。

References

- Arculus, R. J., Ishizuka, O., Bogus, K., et al., 2015. Expedition 351 Summary. In: Proceedings of the International Ocean Discovery Program Volume 351, 1—26.
- Bai, W.H., Wu, Y.B., Gao, Z.L., et al., 2010. Study on the Mechanism of Oil Shale Minerogenetic Enrichment in the Arm of Shallow to Half-Deep Lake Depositional Environment. *Geological Survey and Research*, 33(3): 207—214 (in Chinese with English abstract).
- Baxter, A. T., Burkett, A. M., Charpentier, D., et al., 2013. Expedition 344 Summary. In: Proceedings of the International Ocean Discovery Program Volume 344, 1—26.
- Boyd, P. W., Newton, P. P., 1999. Does Planktonic Community Structure Determine downward Particulate Organic Carbon Flux in Different Oceanic Provinces? *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research*, 46(1): 63—91. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(98\)00066-1](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(98)00066-1)
- Calvert, S. E., Pedersen, T. F., 1993. Geochemistry of Recent Oxidic and Anoxic Marine Sediments: Implications for the Geological Record. *Marine Geology*, 113 (1—2): 67—88. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(93\)90150-T](https://doi.org/10.1016/0025-3227(93)90150-T)
- Cui, B.W., Zhang, S., Fu, X.L., et al., 2021. Organic Sequence Stratigraphic Division and Its Influencing Factors' Analyses for Gulong Shale in Songliao Basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 40 (5): 13—28 (in Chinese with English abstract).
- Deng, C.L., Chen, K.R., 1963. Application and Interpretation of Petrochemical Data in Postgraduate Oil Layers. *Petroleum Geology & Experiment*, (3): 19—25 (in Chinese with English abstract).
- Deng, H.W., 1993. Sedimentary Geochemistry and Environmental Analysis. Gansu Science and Technology Press, Lanzhou, 111—115 (in Chinese).
- Dickinson, W. R., 1976. Plate Tectonic Evolution of Sedimentary Basin. In: Dickinson, W. R., Yarborough, H., eds., Plate Tectonics and Hydrocarbon Accumulation. AAPG Continuing Education Course Note Series, Tulsa, 1: 1—63.
- Ding, C., Sun, P.C., Rexiti, Y.L.K., et al., 2021. Classification and Genesis of Fine-Grained Sedimentary Rocks of Qingshankou Formation in Songliao Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 42(4): 418—427 (in Chinese with English abstract).
- Downing, J. A., Cole, J. J., Middelburg, J. J., et al., 2008. Sediment Organic Carbon Burial in Agriculturally Eutrophic Impoundments over the last Century. *Global Biogeochemical Cycles*, 22(1): GB1018. <https://doi.org/10.1029/2006GB002854>
- Duan, X.N., Wang, X.K., Lu, F., et al., 2008. Carbon Sequestration and Its Potential by Wetland Ecosystems in China. *Acta Ecologica Sinica*, 28(2): 463—469 (in Chinese with English abstract).
- Fei, Z.L., Mao, X.H., Zhu, M.Y., et al., 1988. Studies on the Productivity of the Bohai Sea II. Estimation of Primary Productivity and Potential Fishing Yield. *Acta Oceanologica Sinica*, 10(4): 481—489 (in Chinese with English abstract).
- Ferland, M. E., del Giorgio, P. A., Teodoru, C. R., et al., 2012. Long-Term C Accumulation and Total C Stocks in Boreal Lakes in Northern Québec. *Global Biogeochemical Cycles*, 26(4): GB0E04. <https://doi.org/10.1029/2011GB004241>
- Fu, C., Ding, H., Chen, W.M., 2021. Resources Distribution and Comprehensive Utilization of Oil Shale and Coal Symbiosis in China. *Coal Quality Technology*, 36 (3): 1—13 (in Chinese with English abstract).
- Gao, G., Xiang, B.L., Li, T.T., et al., 2017. Tight Oil System Particularity of Lucaogou Formation in Jimusaer Sag, Junggar Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35 (4): 824—833 (in Chinese with English abstract).
- Gemaisson, G. J., Moore, G. T., 1980. Anoxic Environments and Oil Source Bed Genesis. *AAPG Bulletin*, 64: 1179—1209.
- Gu, J.Y., Guo, B.C., Zhang, X.Y., 2005. Sequence Stratigraphic Framework and Model of the Continental Basins in China. *Petroleum Exploration and Development*, 32 (5): 11—15 (in Chinese with English abstract).

- Guo, B., Shao, L.Y., Ma, S.M., et al., 2017. Coal-Accumulating and Coal-Forming Patterns within Sequence Stratigraphy Framework of Early Cretaceous in Hailar Basins. *Coal Geology & Exploration*, 45(1): 14–19 (in Chinese with English abstract).
- Guo, M., Zhu, J.W., Gong, Q.H., et al., 2006. Sedimentary Characteristic and Formation Environment of Oil Shale in Danzhou, Hainan Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 36(6): 959–962, 1011 (in Chinese with English abstract).
- He, J.L., Chen, Z.H., Dong, D.Z., et al., 2022. The Evolution of Sedimentary Environments of Dongyuemiao Member and Key Factors for Enrichment of Shale Oil and Gas, Northeastern Sichuan Basin. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 42(3): 385–397 (in Chinese with English abstract).
- He, W.Y., Liu, B., Zhang, J.Y., et al., 2023. Geological Characteristics and Key Scientific and Technological Problems of Gulong Shale Oil in Songliao Basin. *Earth Science*, 48(1): 49–62 (in Chinese with English abstract).
- Hou, G.F., Ni, C., Chen, W., et al., 2017. Sedimentary Characteristics and Factors Controlling the Shell Beach in the Da'anzhai Member of the Central Sichuan Basin. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 39(1): 25–34 (in Chinese with English abstract).
- Hu, J.Y., Huang, D.F., Xu, S.B., et al., 1991. The Bases of Nonmarine Petroleum Geology in China. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Huang, D., Duan, Y., Li, Y.C., et al., 2018. Study on the TOC Lower Limit of Shale Oil and Gas of Freshwater Lake Facies: A Case Study on the Jurassic Da'anzhai Member in the Sichuan Basin. *China Petroleum Exploration*, 23(6): 38–45 (in Chinese with English abstract).
- Huang, T.D., Wang, P., Li, H., et al., 2011. The Analysis of Heterotopic Formation about Extremely-Thick Coal Seam in Shaerhu Coalfield. *Xinjiang Geology*, 29(3): 324–326 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, S., Tang, X.L., Osborne, S., et al., 2017. Enrichment Factors and Current Misunderstanding of Shale Oil and Gas: Case Study of Shales in U.S., Argentina and China. *Earth Science*, 42(7): 1083–1091 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, W.J., Qin, M.K., Fan, H.H., et al., 2022. Study on the Relationship between Diagenesis of Cretaceous Yaojia Formation Clastic Rocks and Uranium Mineralization in the Southwest of Songliao Basin. *Uranium Geology*, 38(2): 181–193 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, W.Y., Liu, S., 2015. Distribution and Controlling Factors of High-Quality Hydrocarbon Source Rock in Sequential Stratigraphic Framework—Taking Paleogene System in Qikou Depression for Instance. *China Petroleum Exploration*, 20(2): 51–58 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z.X., Liang, C., Wu, J., et al., 2013. Several Issues in Sedimentological Studies on Hydrocarbon-Bearing Fine-Grained Sedimentary Rocks. *Acta Petrolei Sinica*, 34(6): 1031–1039 (in Chinese with English abstract).
- Jin, X.C., 1981. Origin, Classification and Mineral Composition of Deep-Sea Sediments. *Marine Science Bulletin*, (6): 49–57 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Y., 1977. Some Basic Geological Characteristics of the Continental Oil-Source Rocks in China and Their Originating Conditions. *Acta Geologica Sinica*, 51(1): 19–28 (in Chinese with English abstract).
- Jun, J., Jian, W., Ying, M., et al., 2022. Main Controlling Factors and Development Model of the Oil Shale Deposits in the Late Permian Lucaogou Formation, Junggar Basin. *ACS Earth Space Chem.*, 6(4): 1080–1094.
- Li, B., Zhang, M., Cai Q. H., 2018. Spatial distribution of Macrobenthic Secondary Production of Danjiangkou Reservoir. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 13(4): 22–29 (in Chinese with English abstract).
- Li, D.Q., 1984. On Organic Origin of Ore Deposit in View of the Sedimentary Environment of Dark Siliceous Rocks of Sedimentary Type. *Petroleum Geology & Experiment*, 6(2): 142–145 (in Chinese with English abstract).
- Li, H., Huang, B.Q., Wang, N., 2017. Changes of the Palaeo-Sea Surface Productivity and Bottom Water Dissolved Oxygen Content at MD12–3429, Northern South China Sea. *Acta Palaeontologica Sinica*, 56(2): 238–248 (in Chinese with English abstract).
- Li, H., Lu, J.L., Li, R.L., et al., 2017. Generation Paleoenvironment and Its Controlling Factors of Lower Cretaceous Lacustrine Hydrocarbon Source Rocks in Changling Depression, South Songliao Basin. *Earth Science*, 42(10): 1774–1786 (in Chinese with English abstract).
- Li, J., Qin, R.F., 2018. The Characteristics of Oil Shale and the Controlling Factors of Metallogeny in the Yaojie Oil Shale Ore-Bearing Area. *Coal and Chemical Industry*, 41(4): 43–47 (in Chinese with English abstract).
- Li, L., Meng, Q.T., Liu, Z.J., et al., 2021. Organic Geochemical Characteristics and Organic Matter Source Analysis of Oil Shale and Coal in Paleogene Lijiaya Formation in Huangxian Basin. *Global Geology*, 40(2): 343–353 (in Chinese with English abstract).
- Li, L., Wang, Z.X., Zheng, Y.H., et al., 2019. Mechanism of Shale Oil Enrichment from the Salt Cyclotherm in

- Qian3 Member of Qianjiang Sag, Jiangnan Basin. *Earth Science*, 44(3): 1012—1023 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C.M., 2019. Sedimentary Petrology. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Lin, T.F., Bai, Y.F., Zhao, Y., et al., 2021. Cyclic Stratigraphy of Fine-Grained Sedimentary Rocks and Sedimentary Filling Response Characteristics of Member Qing-1 in Gulong Sag, Songliao Basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 40(5): 29—39 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G. Z., 1959. New Data of Oil Bearing Property in Songliao Plain. *Journal of Beijing University of Geosciences*, 2: 99—106 (in Chinese with English abstract).
- Liu, P.L., Zhou, H.Q., Kang, G.Y., 1986. Distribution of Elements and Its Relation with Sedimentary Environment in Songliao Basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 5(2): 11—15, 18 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q.Q., Chi, Q.H., Wang, X.Q., et al., 2018. Distribution and Influencing Factors of Rare Earth Elements in Carbonate Rocks along Three Continental-Scale Transects in Eastern China. *Earth Science Frontiers*, 25(4): 99—115 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. M., Jiang, L., Liu, B. J., et al., 2023. Investigation of Organic Matter Sources and Depositional Environment Changes for Terrestrial Shale Succession from the Yuka Depression: Implications from Organic Geochemistry and Petrological Analyses. *Journal of Earth Science*, 34(5): 1577—1595. <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1617-1>
- Lu, J., 2017. Fine Sedimentary Cycles and Heterogeneity of Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin (NE China)(Dissertation). Northeast Petroleum University, Daqing(in Chinese with English abstract).
- Lu, S.J., 2022. Analysis on Sedimentary Characteristics and Uranium Mineralization Conditions of the Second and Third Members of Qingshankou Fm in Songliao Basin. *Uranium Mining and Metallurgy*, 41(1): 12—20 (in Chinese with English abstract).
- Miao, J.Y., Zhou, L.F., Deng, K., et al., 2004. Relationship between the Depositional Environment and Geochemistry of Permian Hydrocarbon Source Rocks in the Turpan Depression. *Geology in China*, 31(4): 424—430 (in Chinese with English abstract).
- Ni, D.M., 2021. Geological Features of Continental Shale Reservoir in Lishu Fault Depression of Songliao Basin. *Unconventional Oil & Gas*, 8(3): 33—42 (in Chinese with English abstract).
- Peng, N., Kuang, H.W., Liu, Y.Q., 2011. Sedimentary Evolution and Palaeogeography of the Early Cretaceous Basins from the Northern Qilian Mountains to Jiuxi Areas. *Earth Science Frontiers*, 18(4): 77—87 (in Chinese with English abstract).
- Picard, M. D., 1971. Classification of Fine-Grained Sedimentary Rocks. *Journal of Sedimentary Research*, 41: 179—195.
- Qi, Y.A., Zeng, G.Y., Hu, B., et al., 2007. Trace Fossil Assemblages and Their Environmental Significance from Hetaoyuan Formation of Palaeogene in Biyang Depression of Henan Province. *Acta Palaeontologica Sinica*, 46(4): 441—452 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, Z. J., Ren, W. Z., Chen, J. L., 1993. Coal Field Geology. Coal Industry Press, Beijing, 139 (in Chinese).
- Shi, Z.S., Zhu, X.M., Hu, B., et al., 2005. Deep Water Trace Fossils from the Shahejie Formation of Paleogene of Chechen Sag in Jiyang Depression. *Journal of Palaeogeography*, 7(2): 233—242 (in Chinese with English abstract).
- Sun, L.D., Liu, H., He, W.Y., et al., 2021. An Analysis of Major Scientific Problems and Research Paths of Gulong Shale Oil in Daqing Oilfield, NE China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(3): 453—463 (in Chinese with English abstract).
- Tait, R. V., 1981. Elements of Marine Ecology an Introductory Course (3rd Edition). Butterworths & Co. (Publishers) Ltd., London, 207—218.
- Tu, J.Q., Chen, J.P., Zhang, D.J., et al., 2012. A Petrographic Classification of Macerals in Lacustrine Carbonate Source Rocks and Their Organic Petrological Characteristics: A Case Study on Jiuxi Basin, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(3): 917—926 (in Chinese with English abstract).
- Van Mooy, B. A., Keil, R. G., Devol, A. H., 2002. Impact of Suboxia on Sinking Particulate Organic Carbon: Enhanced Carbon Flux and Preferential Degradation of Amino Acids via Denitrification. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(3): 457—465.
- Wang, C.L., Liu, C.L., Hu, H.B., et al., 2012. Sedimentary Characteristics and Its Environmental Significance of Salt-Bearing Strata of the Member 4 of Paleocene Shashi Formation in Southern Margin of Jiangling Depression, Jiangnan Basin. *Journal of Palaeogeography*, 14(2): 165—175 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D.D., Li, Z.X., Lü, D.W., et al., 2016. Coal and Oil Shale Paragenetic Assemblage and Sequence Stratigraphic Features in Continental Faulted Basin. *Earth Science*, 41(3): 508—522 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L., Zeng, W.T., Xia, X.M., et al., 2019. Study on

- Lithofacies Types and Sedimentary Environment of Black Shale of Qingshankou Formation in Qijia-Gulong Depression, Songliao Basin. *Natural Gas Geoscience*, 30(8): 1125—1133 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.F., 1983. Discovery of Glauconite in Modern Lake Sediments of Fuxian Lake and Preliminary Study on Its Genesis. *Chinese Science Bulletin*, 28(22): 1388—1392 (in Chinese).
- Wu, C.L., Wang, X.Q., Liu, G., et al., 2001. Tectonic Evolution Dynamics of Fushun Basin. *Science in China (Ser. D)*, 31(6): 477—485 (in Chinese).
- Wu, F., Zhan, J.Y., Deng, X.Z., et al., 2012. Influencing Factors of Lake Eutrophication in China—A Case Study in 22 Lakes in China. *Ecology and Environmental Sciences*, 21(1): 94—100 (in Chinese with English abstract).
- Wu, T.T., Shang, F., Chen, R.Q., et al., 2022. Organic Carbon Distribution Characteristics of Qingshankou Shale in Songliao Basin, China. *Earth Science*, 47(11): 4309—4318 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, F., Liu, L.F., Gao, X.Y., et al., 2014. Geological Features and Favorable Area Prediction of the Mid-Jurassic Shale Gas in Kuqa Depression. *Natural Gas Geoscience*, 25(10): 1668—1677 (in Chinese with English abstract).
- Xing, S.Q., Xiao, Z.S., Zhang, S.G., 1982. Mineralogical Characteristics of Glauconite and Conditions of Its Formation in the Taikang Inlet, Songliao Basin. *Acta Mineralogica Sinica*, 2(1): 52—58, 85 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H.D., 1997. Some Problems in the Study of Continental Sequence Stratigraphy. *Oil & Gas Geology*, 18(2): 83—89 (in Chinese with English abstract).
- Xu, S.C., Liu, Z.J., Dong, Q.S., et al., 2012. Deposition and Sedimentary Evolution of Coal, Oil Shale and Evaporite-Bearing Strata in Terrestrial Basins. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(2): 296—303 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y., Shi, W.Z., Zhang, X.M., et al., 2021. Identification Method of Shale Lithofacies by Logging Curves: A Case Study from Wufeng-Longmaxi Formation in Jiaoshiba Area, SW China. *Lithologic Reservoirs*, 33(2): 135—146 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., Zou, C.N., Wu, S.T., et al., 2022. Characteristics, Types, and Prospects of Geological Sweet Sections in Giant Continental Shale Oil Provinces in China. *Journal of Earth Science*, 33(5): 1260—1277. <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1735-9>
- Yu, Y., Liu, D.F., Yang, Z.J., et al., 2017. Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors. *Environmental Science*, 38(4): 1393—1402 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, X.J., Lin, S.H., Liu, Q., et al., 2015. Lacustrine Fine-Grained Sedimentary Features and Organic-Rich Shale Distribution Pattern: A Case Study of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 42(1): 34—43 (in Chinese with English abstract).
- Yukio, S., Yoshimi, S., 1988. A High-Temperature Catalytic Oxidation Method for the Determination of Non-Volatile Dissolved Organic Carbon in Seawater by Direct Injection of a Liquid Sample. *Marine Chemistry*, 24(2): 105—131.
- Zhang, J., Bian, X.F., Chen, S.W., et al., 2013. Shale Gas Resources Prospect of Late Permian Linxi Formation in the Middle-Southern Part of the Da Hinggan Mountains. *Geological Bulletin of China*, 32(8): 1297—1306 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J.C., Jin, Z.J., Yuan, M.S., 2004. Reservoiring Mechanism of Shale Gas and Its Distribution. *Natural Gas Industry*, 24(7): 15—18, 131—132 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J.F., Xu, X.Y., Bai, J., et al., 2020. Enrichment and Exploration of Deep Lacustrine Shale Oil in the First Member of Cretaceous Qingshankou Formation, Southern Songliao Basin, NE China. *Petroleum Exploration and Development*, 47(4): 637—652 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.L., Feng, S., Ma, R.H., et al., 2008. Spatial Pattern of Euphotic Depth and Estimation of Phytoplankton Primary Production in Lake Taihu in Autumn 2004. *Journal of Lake Sciences*, 20(3): 380—388 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.S., Yang, Y.Q., Qi, Z.X., et al., 2003. Sedimentary Characteristics and Environments of the Salt-Bearing Series of Qianjiang Formation of the Paleogene in Qianjiang Sag of Jiangnan Basin. *Journal of Palaeogeography*, 5(1): 29—35 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, G.D., Meng, Q.T., Liu, Z.J., 2020. Geochemical Characteristics and Paleolimnological Information of Oil Shale in 1st Member of Qingshankou Formation in Northern Songliao Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 50(2): 392—404 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, T.X., Luo, W.L., Da, J., et al., 2022. Spatial Distribution of Bacterioplankton Community Composition and Their Diversity in Lake Fuxian during Thermal Stratification Period. *Journal of Lake Sciences*, 34(5): 1642—1655 (in Chinese with English abstract).

- Zhu, R.K., Zou, C.N., Yuan, X.J., et al., 2017. Research Progress and Development Strategic Thinking on Energy Sedimentology. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(5): 1004—1015 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X.M., 2008. Sedimentary Petrology (4th Edition). Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Zou, C.N., Dong, D.Z., Wang, S.J., et al., 2010. Geological Characteristics, Formation Mechanism and Resource Potential of Shale Gas in China. *Petroleum Exploration and Development*, 37(6): 641—653 (in Chinese with English abstract).
- ### 中文参考文献
- 拜文华, 吴彦斌, 高智梁, 等, 2010. 浅湖—半深湖相湖湾环境油页岩成矿富集机理研究. 地质调查与研究, 33(3): 207—214.
- 崔宝文, 张顺, 付秀丽, 等, 2021. 松辽盆地古龙页岩有机层序地层划分及影响因素. 大庆石油地质与开发, 40(5): 13—28.
- 邓茨兰, 陈克仁, 1963. 岩石化学资料在研究生油层中的运用和解释. 石油地质实验文摘, (3): 19—25.
- 邓宏文, 1993. 沉积地球化学与环境分析. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 111—115.
- 丁聪, 孙平昌, 热西提·亚力坤, 等, 2021. 松辽盆地青山口乡青山口组细粒沉积岩分类及其成因. 新疆石油地质, 42(4): 418—427.
- 段晓男, 王效科, 逯非, 等, 2008. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力. 生态学报, 28(2): 463—469.
- 费尊乐, 毛兴华, 朱明运, 等, 1988. 渤海生产力研究: II. 初级生产力及潜在渔获量的估算. 海洋学报, 10(4): 481—489.
- 傅丛, 丁华, 陈文敏, 2021. 我国油页岩与煤共生资源分布及综合利用. 煤质技术, 36(3): 1—13.
- 高岗, 向宝力, 李涛涛, 等, 2017. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油系统的成藏特殊性. 沉积学报, 35(4): 824—833.
- 顾家裕, 郭彬程, 张兴阳, 2005. 中国陆相盆地层序地层格架及模式. 石油勘探与开发, 32(5): 11—15.
- 郭彪, 邵龙义, 马施民, 等, 2017. 海拉尔盆地群下白垩统层序格架内聚煤特征与成煤模式. 煤田地质与勘探, 45(1): 14—19.
- 郭敏, 朱建伟, 宫清华, 等, 2006. 海南儋州长坡组油页岩矿沉积特征及形成环境. 吉林大学学报(地球科学版), 36(6): 959—962, 1011.
- 何江林, 陈正辉, 董大忠, 等, 2022. 川东地区东岳庙段沉积环境演化及其页岩油气富集主控因素分析. 沉积与特提斯地质, 42(3): 385—397.
- 何文渊, 柳波, 张金友, 等, 2023. 松辽盆地古龙页岩油地质特征及关键科学问题探索. 地球科学, 48(1): 49—62.
- 厚刚福, 倪超, 陈薇, 等, 2017. 川中地区大安寨段介壳滩沉积特征及控制因素. 西南石油大学学报(自然科学版), 39(1): 25—34.
- 胡见义, 黄第藩, 徐树宝, 等, 1991. 中国陆相石油地质理论基础. 北京: 石油工业出版社.
- 黄东, 段勇, 李育聪, 等, 2018. 淡水湖相页岩油气有机碳含量下限研究: 以四川盆地侏罗系大安寨段为例. 中国石油勘探, 23(6): 38—45.
- 黄铁栋, 王平, 李慧, 等, 2011. 沙尔湖煤田巨厚煤层异地成煤分析. 新疆地质, 29(3): 324—326.
- 蒋恕, 唐相路, Steve Osborne, 等, 2017. 页岩油气富集的主控因素及误辩: 以美国、阿根廷和中国典型页岩为例. 地球科学, 42(7): 1083—1091.
- 江文剑, 秦明宽, 范洪海, 等, 2022. 松辽盆地西南部白垩系姚家组碎屑岩成岩作用与铀成矿. 铀矿地质, 38(2): 181—193.
- 姜文亚, 柳飒, 2015. 层序地层格架中优质烃源岩分布与控制因素: 以歧口凹陷古近系为例. 中国石油勘探, 20(2): 51—58.
- 姜在兴, 梁超, 吴靖, 等, 2013. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题. 石油学报, 34(6): 1031—1039.
- 金性春, 1981. 深海沉积物的来源、分类与矿物组成. 海洋科技资料, (6): 49—57.
- 锦言, 1977. 我国陆相生油岩的若干基本地质特征及其形成条件. 地质学报, 51(1): 19—28.
- 李斌, 张敏, 蔡庆华, 2018. 丹江口水库底栖动物群落次级生产力空间分布. 生态毒理学报, 13(4): 22—29.
- 李道琪, 1984. 从暗色沉积型硅质岩的形成环境看有机成矿. 石油实验地质, 6(2): 142—145.
- 李浩, 陆建林, 李瑞磊, 等, 2017. 长岭断陷下白垩统湖相烃源岩形成古环境及主控因素. 地球科学, 42(10): 1774—1786.
- 李鹤, 黄宝琦, 王娜, 2017. 南海北部MD12-3429站位海水古生产力和溶解氧含量特征. 古生物学报, 56(2): 238—248.
- 李靖, 秦荣芳, 2018. 窑街油页岩含矿区油页岩特征及成矿控制因素. 煤炭与化工, 41(4): 43—47.
- 李乐, 王自翔, 郑有恒, 等, 2019. 江汉盆地潜江凹陷潜三段盐韵律层页岩油富集机理. 地球科学, 44(3): 1012—1023.
- 李丽, 孟庆涛, 刘招君, 等, 2021. 黄县盆地古近系李家崖组油页岩与煤有机地球化学特征及有机质来源分析. 世界地质, 40(2): 343—353.
- 林春明, 2019. 沉积岩石学. 北京: 科学出版社.
- 林铁锋, 白云凤, 赵莹, 等, 2021. 松辽盆地古龙凹陷青一段细粒沉积岩旋回地层分析及沉积充填响应特征. 大庆石油地质与开发, 40(5): 29—39.
- 刘官植, 1959. 松遼平原含油性的新资料. 北京地质学院学报, 2: 99—106.
- 刘平略, 周厚清, 康桂云, 1986. 松辽盆地元素分布及其与沉积环境的关系. 大庆石油地质与开发, 5(2): 11—15, 18.

- 柳青青, 迟清华, 王学求, 等, 2018. 中国东部大陆尺度地球化学走廊带碳酸盐岩稀土元素分布特征与影响因素. 地学前缘, 25(4): 99—115.
- 卢胜军, 2022. 松辽盆地青山口组二、三段沉积特征及铀成矿分析. 铀矿冶, 41(1): 12—20.
- 陆军, 2017. 古龙地区青山口组细粒沉积旋回及非均质性(硕士学位论文). 大庆: 东北石油大学.
- 苗建宇, 周立发, 邓昆, 等, 2004. 吐鲁番坳陷二叠系烃源岩地球化学与沉积环境的关系. 中国地质, 31(4): 424—430.
- 倪冬梅, 2021. 松辽盆地梨树断陷陆相页岩储层地质特征及地质意义. 非常规油气, 8(3): 33—42.
- 彭楠, 旷红伟, 柳永清, 2011. 北祁连—酒西地区早白垩世盆地沉积特征与古地理演化. 地学前缘, 18(4): 77—87.
- 齐永安, 曾光艳, 胡斌, 等, 2007. 河南泌阳凹陷古近纪核桃园组遗迹化石组合及其环境意义: 兼论深水湖泊遗迹相特征. 古生物学报, 46(4): 441—452.
- 邱震杰, 任文忠, 陈家良, 1993. 煤田地质学. 北京: 煤炭工业出版社, 139.
- 施振生, 朱筱敏, 胡斌, 等, 2005. 济阳坳陷车镇凹陷古近系沙河街组深水沉积中的遗迹化石. 古地理学报, 7(2): 233—242.
- 孙龙德, 刘合, 何文渊, 等, 2021. 大庆古龙页岩油重大科学问题与研究路径探析. 石油勘探与开发, 48(3): 453—463.
- 涂建琪, 陈建平, 张大江, 等, 2012. 湖相碳酸盐岩烃源岩有机显微组分分类及其岩石学特征: 以酒西盆地为例. 岩石学报, 28(3): 917—926.
- 王春连, 刘成林, 胡海兵, 等, 2012. 江汉盆地江陵凹陷南缘古新统沙市组四段含盐岩系沉积特征及其沉积环境意义. 古地理学报, 14(2): 165—175.
- 王东东, 李增学, 吕大伟, 等, 2016. 陆相断陷盆地煤与油页岩共生组合及其层序地层特征. 地球科学, 41(3): 508—522.
- 王岚, 曾雯婷, 夏晓敏, 等, 2019. 松辽盆地齐家—古龙凹陷青山口组黑色页岩岩相类型与沉积环境. 天然气地球科学, 30(8): 1125—1133.
- 王云飞, 1983. 抚仙湖现代湖泊沉积物中海绿石的发现及成因的初步研究. 科学通报, 28(22): 1388—1392.
- 吴冲龙, 汪新庆, 刘刚, 等, 2001. 抚顺盆地构造演化动力学研究. 中国科学(D辑: 地球科学), 31(6): 477—485.
- 吴锋, 战金艳, 邓祥征, 等, 2012. 中国湖泊富营养化影响因素研究: 基于中国 22 个湖泊实证分析. 生态环境学报, 21(1): 94—100.
- 武田田, 商斐, 陈睿倩, 等, 2022. 松辽盆地青山口组页岩有机碳含量分布特征. 地球科学, 47(11): 4309—4318.
- 肖飞, 刘洛夫, 高小跃, 等, 2014. 库车坳陷中侏罗统页岩气地质特征及有利区预测. 天然气地球科学, 25(10): 1668—1677.
- 邢顺淦, 肖祝胜, 张书贵, 1982. 泰康湖湾海绿石矿物学特征及其形成条件的探讨. 矿物学报, 2(1): 52—58, 85.
- 徐怀大, 1997. 陆相层序地层学研究中的某些问题. 石油与天然气地质, 18(2): 83—89.
- 许圣传, 刘招君, 董清水, 等, 2012. 陆相盆地含煤、油页岩和蒸发盐地层单元沉积演化. 吉林大学学报(地球科学版), 42(2): 296—303.
- 杨洋, 石万忠, 张晓明, 等, 2021. 页岩岩相的测井曲线识别方法: 以焦石坝地区五峰组—龙马溪组为例. 岩性油气藏, 33(2): 135—146.
- 俞焰, 刘德富, 杨正健, 等, 2017. 千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素. 环境科学, 38(4): 1393—1402.
- 袁选俊, 林森虎, 刘群, 等, 2015. 湖盆细粒沉积特征与富有机质页岩分布模式: 以鄂尔多斯盆地延长组长 7 油层组为例. 石油勘探与开发, 42(1): 34—43.
- 张健, 卞雄飞, 陈树旺, 等, 2013. 大兴安岭中南部上二叠统林西组页岩气资源前景. 地质通报, 32(8): 1297—1306.
- 张金川, 金之钧, 袁明生, 2004. 页岩气成藏机理和分布. 天然气工业, 24(7): 15—18, 131—132.
- 张君峰, 徐兴友, 白静, 等, 2020. 松辽盆地南部白垩系青一段深湖相页岩油富集模式及勘探实践. 石油勘探与开发, 47(4): 637—652.
- 张永生, 杨玉卿, 漆智先, 等, 2003. 江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组含盐岩系沉积特征与沉积环境. 古地理学报, 5(1): 29—35.
- 张运林, 冯胜, 马荣华, 等, 2008. 太湖秋季真光层深度空间分布及浮游植物初级生产力的估算. 湖泊科学, 20(3): 380—388.
- 郑国栋, 孟庆涛, 刘招君, 2020. 松辽盆地北部青一段油页岩地球化学特征及其记录的古湖泊学信息. 吉林大学学报(地球科学版), 50(2): 392—404.
- 周天旭, 罗文磊, 笪俊, 等, 2022. 抚仙湖垂向分层期间水体细菌群落结构组成及多样性的空间分布. 湖泊科学, 34(5): 1642—1655.
- 朱如凯, 邹才能, 袁选俊, 等, 2017. 中国能源沉积学研究进展与发展战略思考. 沉积学报, 35(5): 1004—1015.
- 朱筱敏, 2008. 沉积岩石学(4版). 北京: 石油工业出版社.
- 邹才能, 董大忠, 王社教, 等, 2010. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力. 石油勘探与开发, 37(6): 641—653.